L'INVENTION DE LA DIODE.
A PROPOS DU CINQUANTENAIRE DU BREVET FLEMING.[1]

(Brevet anglais 24 850/04)

PAR

Léon BOUTHILLON
Ancien Président de la Société des Radioélectriciens

1. — Quand notre président, m'ayant rappelé que le brevet de FLEMING sur la diode détectrice a cinquante ans, m'a demandé s'il ne convenait pas de rappeler la date de cette invention, je me suis tout de suite, et peut être trop vite, déclaré d'accord pour le faire devant vous, pensant que mon travail se trouverait tout préparé dans deux livres de FLEMING lui-même dont j'avais gardé le souvenir, « *The principles of electric wave telegraphy* » publié en 1906, et « *The thermionic valve and its developments in radiotelegraphy and telephony* », paru en 1919. J'avais autrefois gardé de la lecture de ces deux ouvrages l'impression que leur auteur, collaborateur de MARCONI au début du siècle, avait su à la fois mettre en lumière l'œuvre de celui-ci et la valeur qu'il attribuait à ses propres travaux. Je pensais donc que mon rôle pourrait se borner à consulter ces deux ouvrages, ainsi que le brevet de 1904, pour trouver toutes les indications utiles. Je me suis rapidement convaincu que mon travail devait être beaucoup plus étendu.

C'est, pour employer l'expression à la mode, les recherches fondamentales et l'origine des applications qu'il s'agissait d'explorer. Nous verrons que les études ont été nombreuses, et j'ai conclu pour ma part qu'il n'y a pas « un » inventeur de la diode, mais de nombreuses contributions parmi lesquelles plusieurs noms se distinguent particulièrement. Suivant qu'on attachera plus ou moins d'importance à la recherche de base ou à l'une ou l'autre des applications, tel ou tel de ces noms s'éclairera d'une plus vive lumière. Dans ces conditions, une conclusion tendant à désigner « un » inventeur de la diode ne saurait avoir une valeur générale ; le seul travail utile me paraît être d'apporter des informations, aussi étendues que possible, empruntées à des documents originaux et, autant que possible, par des extraits des publications faites par les savants ou les inventeurs à l'époque même de leurs travaux. Ainsi se trouve fixée la méthode de la présente communication, qui se présentera finalement comme un instrument de travail auquel chacun de nous pourra, suivant son point de vue, apporter la conclusion appropriée.

2. — Le célèbre livre de J.J. THOMSON « Passage de l'électricité à travers les gaz » [47], au début du chapitre VIII qui traite de l'« *Ionisation par les solides incandescents* », indique :

> « On sait, depuis près de deux siècles, que l'air est conducteur au voisinage des métaux à la température du rouge. Les premières observations ont été faites par DU FAY en 1725, par DU TOUR en 1745, par WATSON en 1746, par PRIESTLEY en 1767 et par CAVALLO en 1785 ».

Je n'ai pas trouvé le livre de CAVALLO, mais je me suis reporté aux autres références. Pour DU FAY, je n'ai vu, dans l'« *Histoire de l'Académie des Sciences pour* 1733 (*Mémoires de mathématiques et de physique*) » où sont publiés plusieurs importants mémoires de DU FAY sur l'électricité statique, que les indications suivantes [1] :

> «... tous les corps peuvent devenir électriques par l'approche du tuyau de verre frotté d'une manière convenable à exciter en lui cette vertu... ; un fer rouge et un charbon ardent posés sur un guéridon de verre le deviennent extrêmement (électriques) ; ainsi ce cas particulier n'est pas une exception à l'observation générale que nous avons apportée, qui est que tous les corps peuvent devenir électriques par la simple appro-

---

(1) Communication faite à la 7e section, le 25 février 1955.

Les numéros de figures inscrits en chiffres arabes sont ceux des documents d'où elles sont tirées. Les figures non extraites de documents originaux sont numérotées dans chaque paragraphe par des chiffres romains.

Les références bibliographiques, rassemblées à la fin de l'article, sont rappelées dans les paragraphes par leurs numéros.

che d'un autre corps dans lequel cette vertu a été excitée ».

Ces indications d'où il résulterait que les corps incandescents ne posséderaient aucune propriété électrique particulière ne sauraient suffire à faire classer DU FAY parmi les précurseurs de la diode à électrode incandescente.

3. — J'ai lu avec soin, sans y trouver d'indications intéressantes, les mémoires de WATSON [2] et de DU TOUR [3].

4. — Joseph PRIESTLEY [4] apporte, pour la première fois, quelques éléments positifs. Dans son « *History of electricity* » publié en 1767, il décrit une série d'expériences faites pendant l'année 1766. Dans le chapitre : « *Expériences sur la puissance conductrice des différentes substances* », nous trouvons à propos d'une recherche où il s'agit de constater si le verre chaud est ou non conducteur de l'électricité:

« Je me précautionnai d'un tube de verre d'environ quatre pieds de longueur et, au moyen du mercure que je versai dedans, et d'une feuille d'étain que j'y appliquai en dehors, je chargeai environ neuf pouces de sa partie inférieure. Ensuite, tirant soigneusement la feuille d'étain et renversant le mercure, je fis chauffer jusqu'au rouge la partie chargée du verre, et je trouvai en plaçant la garniture qu'il était déchargé.

« Je répétai l'expérience une seconde fois avec le même succès, de sorte que je ne doutai pas que ce verre, étant rouge, ne fût perméable au fluide électrique ; il n'aurait pas pu faire le tour pour aller du dedans au dehors sans parcourir une surface de six pieds de verre, dont la plus grande partie était très froide, et le tout parfaitement sec.

« Il est évident que la charge ne s'était pas perdue en traversant le vif-argent ; quand je répétai cette expérience sans chauffer le verre, la charge se trouva fort peu diminuée ».

Plus loin, J. PRIESTLEY rapporte des expériences sur la décharge des corps électrisés par une chandelle placée entre deux bâtons de verre chargés, et il ajoute (d'après la traduction française publiée à Paris [5] :

« Pour comparer le pouvoir conducteur de la flamme avec celui d'autres corps, qui ont plus de chaleur mais qui fournissent moins d'émanations, je mis une pelle rouge entre les verges, mais cela ne produisit la décharge de la batterie que lorsque les verges furent rapprochées d'environ un pouce et demi l'une de l'autre, de sorte que l'explosion se fit à peu près au double de la distance ordinaire, en y comprenant l'espace occupé par la pelle ; cependant l'air dans le voisinage de la pelle était plus de deux fois plus chaud que dans le voisinage de la chandelle, vu la distance à laquelle on tenait les verges. Les deux parties de la pelle rouge furent marquées d'un cercle imparfait semblable à ceux qui furent imprimés sur chacun des boutons de cuivre...

« J'interposai ensuite un morceau de verre chaud jusqu'à rougeur, qui a autant de chaleur que le fer, mais qui fournit moins d'émanations ; mais il n'opéra la décharge que quand j'eus approché les verges de cuivre à un pouce l'une de l'autre, ce qui était si proche que le verre les touchait presque toutes les deux ».

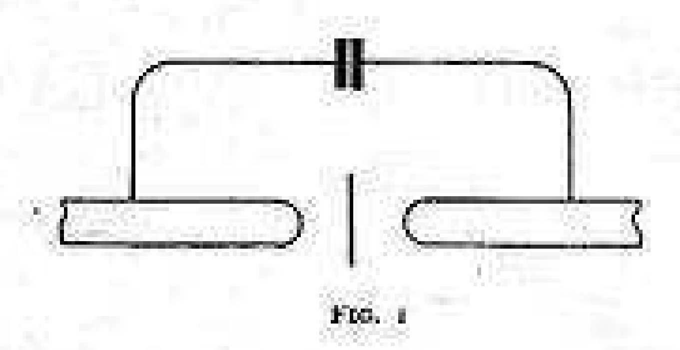


FIG. 1

5. — Voici maintenant des expériences de GROVE [6] dans lesquelles pour la première fois, nous trouvons des électrodes enfermées dans des tubes de verre et chauffées par le passage d'un courant.

L'expérience suivante rappelle celle de PRIESTLEY.

« Dans l'extrémité fermée d'un tube coudé (fig. 2), une boucle de fil de platine AB et deux fils de platine CD étaient scellés hermétiquement, les extrémités de ces derniers étant rapprochées aussi près que possible et l'intervalle qui les sépare étant voisin et immédiatement au-dessus du sommet de la boucle. Le tube étant rempli d'hydrogène et le fil AB connecté à une batterie voltaïque de puissance suffisante pour l'élever à un aussi haut degré d'incandescence qu'il est possible sans le faire fondre ; C et D étaient maintenant connectés aux pôles d'une autre batterie, un galvanomètre sensible était interposé dans le circuit. Pas le moindre effet sur l'aiguille du galvanomètre ne put être décelé, et un effet négatif semblable fut observé si le tube était rempli d'air atmosphérique ».

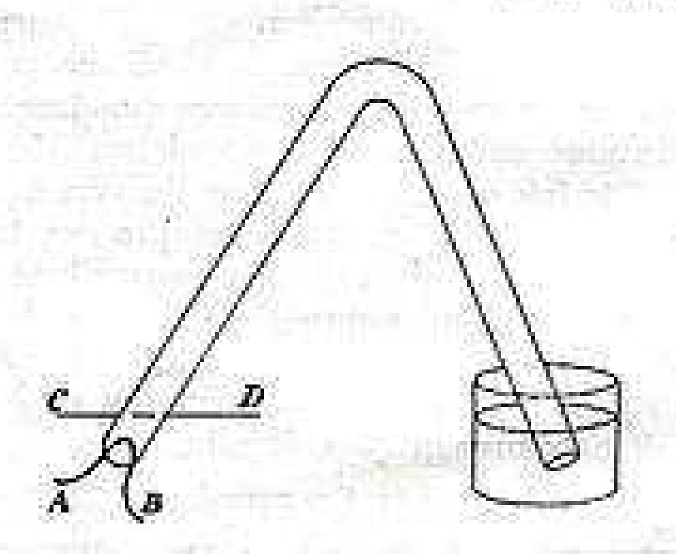


FIG. 2

Et voilà une autre expérience :

« Deux portions parallèles de fil de platine étaient maintenant placées à proximité immé-

diate l'une de l'autre (voir fig. 3) de sorte que chacune pouvait être portée à l'incandescence par des batteries isolées séparément. Dans l'air atmosphérique ou l'hydrogène et avec une pleine incandescence, pas la moindre conduction ne put être décelée sur l'intervalle entre les fils avec deux éléments de batterie à l'acide nitrique, et ayant la possibilité, grâce à l'ama-

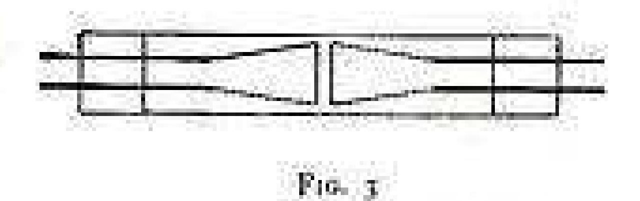


Fig. 3

bilité de M. Gassiot, de répéter cette expérience avec sa batterie de cinq cents éléments bien isolés de la combinaison d'acide nitrique, l'air ne conduisait pas quand les éléments étaient rapprochés au 1/50 d'inch. En les approchant, ils venaient à la distance de collage, fondaient instantanément et l'aiguille du galvanomètre qui était restée jusque-là parfaitement stationnaire tournait rapidement et sortait du champ.

« Je pense que je suis autorisé à en conclure que nous n'avons aucune indication expérimentale de ce que la matière à l'état gazeux conduise l'électricité voltaïque... ».

Ce résultat négatif ne fut confirmé par aucun des expérimentateurs qui suivirent.

6. — Nous avons jusqu'ici bien peu de chose. Avec les recherches de E. Becquerel (1853) [8], nous trouvons au contraire d'importants résultats que confirmera l'avenir.

L'auteur se proposait d'étudier la conductibilité électrique des gaz chauds.

Le schéma de principe est celui de la fig. 1.

Les fig. 1, 2, et 3 représentent l'appareillage utilisé.

Nous y trouvons pour la première fois un ensemble de deux électrodes, l'une centrale, l'autre périphérique, l'une des deux électrodes étant portée à l'incandescence, c'est-à-dire ce que nous appellerons maintenant une *diode*. Les deux électrodes sont toutes deux chauffées, disposition que nous retrouverons jusqu'à Fleming (1896, parag. 23).

L'expérience consiste à faire deux lectures :

1° EF et E'F' étant court-circuités ;

2° EE' étant court-circuité.

F' étant relié au conducteur central de la diode et F au tube de platine, le circuit, court-circuité dans

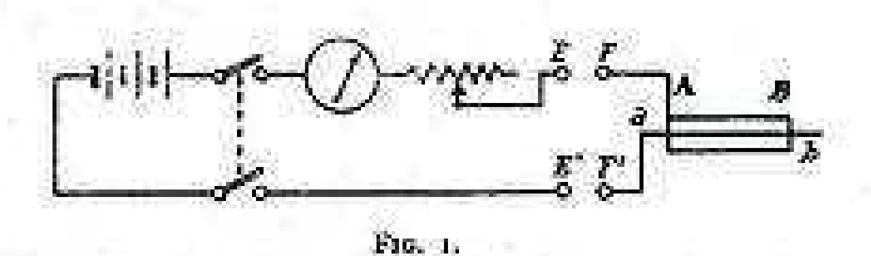


Fig. 1.

la seconde opération, contient, dans la première, l'espace compris entre les deux électrodes de la diode.

On règle le rhéostat de façon que dans la seconde mesure la déviation du galvanomètre soit la même que dans la première et on lit chaque fois le nombre de tours du rhéostat contenu dans le circuit.

AB, tube de platine (longueur 65 cm, diamètre intérieur 2 cm) ; *A'B'*, tube de terre réfractaire traversant un fourneau horizontal (*A''B''* = 10 cm) ; ouvert si le gaz étudié est l'air atmosphérique, fermé ou en communication avec un gazomètre s'il s'agit d'un autre gaz ; *P*, pile ; *H*, commutateur ; *M*, galvanomètre ; *C C' D D'*, rhéostat.

Dans le cas d'expériences dans l'air, un fil de platine *ab* est placé sur l'axe du tube *AB* sur toute la longueur (fig. 2).

Dans le cas d'expériences avec des gaz autres que l'air, une tige de platine iridié *ab*, placée sur l'axe du tube *AB*, arrive jusqu'au milieu de sa longueur (fig. 1).

Dans certaines expériences dans l'air, 2 fils *ab*, *a'b'*, sont placés dans le tube *AB*, parallèlement aux génératrices (fig. 3).

(E. Becquerel. — Annales de Chimie et de Physique, 1853, p. 355-402).

La différence des deux lectures donne l'équivalent en rhéostat de la résistance du gaz chauffé.

Et voici le résumé des résultats obtenus.

« Les résultats qui sont exposés dans le présent travail mettent bien en évidence les propriétés que possèdent les gaz de livrer passage aux courants électriques lorsqu'ils environnent des électrodes métalliques parfaitement isolées et que leur température est suffisamment élevée. Les gaz acquièrent cette faculté à la température rouge naissante, et à partir de cette limite ils transmettent d'autant mieux l'électricité que leur température s'élève plus haut ; ils livrent alors passage même aux plus faibles courants électriques que l'on puisse produire à l'aide d'un couple de petite dimension.

« Cette propriété est générale à tous les fluides aériformes. En opérant avec l'hydrogène, l'oxygène, l'acide carbonique, l'azote, le chlore, la vapeur d'eau, etc... comme avec l'air on observe des effets analogues, mais plus ou moins marqués suivant leur nature ».

. . . .

« Les dimensions relatives des électrodes en platine qui servent à transmettre les courants électriques au travers des gaz ont une influence telle que la proportion d'électricité qui passe est plus grande quand on augmente la surface de l'électrode négative... ».

« La résistance d'un gaz à la transmission de l'électricité varie avec le nombre des couples de la pile et avec l'intensité du courant électrique qui la traverse. ».

. . . .

« Au-dessous de la température du rouge il n'y a pas de différence appréciable entre un gaz raréfié et un gaz à la pression ordinaire, l'électricité ne peut cheminer entre les électrodes métalliques qui s'y trouvent plongées ; au-dessus de cette limite les différences commencent à se manifester et le gaz dilaté transmet toujours mieux l'électricité.

« Lorsqu'on diminue la force élastique de l'air ou d'un gaz porté à la température du rouge, sa résistance diminue, et une fois arrivé au plus haut degré de raréfaction que puisse produire la machine pneumatique, le milieu gazeux ainsi raréfié atteint son minimum de résistance, qui néanmoins est encore facilement appréciable. La diminution de force élastique dans chaque gaz à égalité de température rend leurs résistances de moins en moins différentes l'une de l'autre, et quand on arrive à une pression de 3 ou 4 millimètres de mercure (au vide de la machine pneumatique), tous les gaz raréfiés transmettent également bien les courants électriques ».

. . . .

Relevons encore ceci :

« Quand on opère à l'aide du fil de platine disposé comme le représente la fig. 2 et que le courant circule à travers le gaz échauffé, on peut faire communiquer le fil *ab* avec le pôle positif du couple ou bien avec le pôle négatif. Cette circonstance n'est pas indifférente. Quand le fourneau est bien en feu et que l'on fait ainsi passer alternativement le courant dans un sens ou dans l'autre, au travers du gaz chaud, on trouve une différence d'effet indiquant que la déviation est plus forte lorsque le fil est positif et le tube de platine négatif, que lorsque l'inverse a lieu ».

. . . .

« ... la différence des effets est plus grande quand la tension électrique est moindre ; elle semble devenir plus faible à mesure que la température s'élève ; mais elle disparaît complètement quand on diminue la pression du gaz intérieur ; alors... l'action est la même quel que soit le sens du courant ».

C'est la première expérience où sont observés d'une part le passage du courant entre les deux électrodes placées dans un gaz ou dans le vide, sous l'action d'une force électromotrice, et d'autre part la dissymétrie des effets suivant le sens du courant.

7. — Quinze ans passent et, en 1869, W.H. Hittorf publie la première partie d'une étude sur la conductibilité électrique des gaz, qui ne s'achèvera que quinze ans plus tard, en 1884, et que nous retrouverons à cette date [8].

8. — En 1873, Guthrie [9] (Fleming étant son assistant) apporte quelques indications importantes et de nouvelles précisions.

Dans une première série d'expériences, il utilise des billes de fer (environ 5 cm de diamètre) chauffées au rouge ou au blanc dans un feu de coke et pouvant être tenues dans des pinces isolantes ou conductrices.

Je donne ci-dessous quelques citations.

Voici, d'abord, avec des billes chauffées au blanc :

« 6 — *Expérience*. Une bille de fer chauffée au blanc sur une pince de métal (donc en connexion avec la terre) est tenue au-dessus de la partie supérieure d'un électroscope chargé d'électricité positive. A la distance d'un ou deux inches, les feuilles tombent rapidement et ne s'écartent plus quand on enlève la bille.

« 7. — *Expérience*. L'électroscope est chargé d'électricité négative, les autres conditions étant celles du parag. 6. Quand la bille est à une distance de trois ou quatre inches l'électroscope est déchargé rapidement, d'une façon permanente, et complètement.

« 8. — *Expérience*. L'électroscope est chargé d'électricité positive. La bille de fer chauffée au blanc est sortie du four avec la pince isolante et portée au-dessus de l'électroscope. Une décharge parfaite et permanente se produit quand la distance entre les deux est environ un inch.

« 9. — *Expérience*. L'électroscope est chargé d'électricité négative, l'expérience étant pour

le reste celle du parag. 8. L'électroscope perd sa charge complètement et d'une façon permanente quand la distance est deux ou trois inches c'est-à-dire sensiblement plus grande qu'avec l'électricité positive.

. . . .

« 14. — Le succès des expériences ci-dessus avec des billes chauffées au blanc tient à ce que les billes sont à la chaleur d'un blanc brillant. Plus la chaleur est grande, mieux cela vaut...

Et maintenant, avec les billes chauffées au rouge :

« 20. — *Expérience.* A une chaleur rouge peu accentuée, une bille, isolée ou mise à la terre, ne décharge pas un électroscope chargé positivement à la distance d'un ou deux inches.

« 21. — *Expérience.* Une bille, à la chaleur rouge peu accentué décharge l'électricité quand elle est connectée à la terre, mais pas quand elle est isolée... ».

Dans une seconde série d'expériences, le corps incandescent est un fil de platine.

« 28. — *Expérience.* Au moyen de 8 éléments platine-zinc un fil de platine de 0,01 inch de diamètre et 6 inches de long est porté au blanc. Un électroscope chargé positivement est placé 1 inch au-dessus de cette bobine. Environ 3 secondes après la fermeture du circuit le fil de platine est chauffé au blanc et en même temps toute l'électricité est déchargée. Avec l'électricité négative la décharge est encore plus rapide et est complète même avant que le fil soit chauffé au blanc... Si le fil est près de son point de fusion, il y a peu de différence dans la distance ou le temps dans lequel l'effet est produit avec les deux sortes d'électricité.

« 29. — *Expérience.* 9 inches du fil de platine du parag. 28 sont courbés en une boucle unique circulaire horizontale, à un inch au-dessus de l'électroscope qui était chargé d'électricité. Le fil était chauffé au rouge juste visible. Les feuilles de l'électroscope tombèrent en deux secondes, dont l'une est certainement occupée par le chauffage du fil et l'autre n'est pas plus que le temps nécessaire à la chute des feuilles. Tout se passe comme si la chute des feuilles est instantanée. Un électroscope chargé positivement dans les mêmes conditions demandait 6 ou 7 secondes pour être déchargé.

. . . .

« 31. — *Expérience.* Une batterie de 8 éléments n'était pas suffisante pour chauffer 12 inches de platine même au rouge peu accentué. Une telle boule chauffée non lumineuse déchargeait un électroscope chargé d'électricité négative à la distance d'un inch. Une charge positive n'était par perceptiblement affectée.

. . . .

« 35. — Les expériences avec électroscope peuvent être remplacées presque toutes avec l'électricité condensée d'une bouteille de Leyde.. La décharge d'une bouteille n'est jamais aussi rapide et complète que celle d'un électroscope ».

Ces expériences montrent pour la première fois la dissymétrie des effets produits par les métaux incandescents sur les électricités positive et négative.

Et voici, enfin, une expérience que je considère comme très importante :

« Le bouton poli et noirci d'une bouteille de Leyde, ou le bouton noirci connecté à un électroscope est au foyer principal d'un miroir métallique sphérique de 18 inches de diamètre. Au foyer d'un miroir conjugué est placée une bille de fer chauffée au blanc. Les centres des miroirs sont distants de 5 feet 9 inches et leurs foyers sont distants de 3 feet 10 inches. Bien qu'en 1,5 minute les objets noircis deviennent trop chauds pour être tenus à la main, bien que le papier soit noirci au foyer récepteur, ni électricité positive ni négative d'une bouteille ou d'un électroscope n'est déchargée ».

Et le paragraphe suivant nous dit :

« 43. — Les expériences parag. 42 montrent qu'une certaine proximité doit exister entre la source de chaleur et le corps chargé pour que la décharge puisse avoir lieu et que la décharge n'est pas due seulement à l'intensité de la chaleur ».

Cette conclusion que si, dans certaines conditions, les gaz conduisent l'électricité, ce n'est pas à la chaleur qu'ils doivent cette propriété, comme l'avaient cru les expérimentateurs précédents, l'avenir se chargera de la confirmer en déterminant quel est l'agent de cette conductivité. Pour cela, vingt ans seront encore nécessaires.

9. — Cependant en 1881, Blondlot [10] qui ne connaissait vraisemblablement pas les expériences de Guthrie, affirme encore l'existence d'un pouvoir conducteur des gaz, et décrit à l'appui l'expérience suivante :

«... sur un circuit son installés un élément à sulfate de cuivre et un électromètre capillaire ; le courant est interrompu en un point et chacune des extrémités du fil est reliée à une plaque de platine d'environ 0,03 m de diamètre ; les deux plaques sont maintenues verticales, en regard et parallèles, au moyen de longs tuyaux de pipe isolés à la partie inférieure. La distance des plaques étant réglée à 0,002 ou 0,003 m, il est clair que le circuit est interrompu par la couche d'air interposée et que l'électromètre reste immobile.

« Voici maintenant l'expérience. On commence par fermer l'électromètre sur lui-même au moyen du pont qui lui est amené ; puis avec un chalumeau de lampe d'émailleur, on porte au rouge les deux plaques de platine (pendant cette opération l'électromètre reste toujours au zéro puisqu'il est fermé par le pont). On enlève alors la flamme, puis, un instant après, le pont ; aussitôt le mercure de l'électromètre sort du champ du microscope. Par conséquent la conti-

nuité du circuit, qui était interrompue par l'air froid, est rétablie par l'air chaud : il ne peut rester aucun doute sur l'existence de la conductibilité voltaïque des gaz chauds ».

Et Blondlot ajoute qu'il a obtenu des résultats semblables bien au-dessous du rouge, quand

> « la température moyenne du gaz est assez peu élevée pour qu'on puisse y maintenir la main ».

observation isolée qu'une note suivante ne confirmera pas.

Mais voici une autre observation à retenir, qui confirme l'existence des dissymétries déjà observées par E. Becquerel (parag. 6).

> « J'ai observé que si les deux plaques de platine sont inégalement chauffées, il se produit des forces électromotrices considérables. La plaque la plus chaude constitue un pôle négatif par rapport à l'autre ».

Observation précieuse, puisque nous avons dans cette expérience un nouvel élément constitutif de la diode moderne : le fait que les deux électrodes sont inégalement chauffées, et la constatation de son importance dans le fonctionnement.

10. — En 1882, Elster et Geitel [11], en Autriche, publient un mémoire « Sur l'électricité de la flamme ». On y trouve dans un paragraphe intitulé « Comportement thermoélectrique de fils de platine séparés par une couche d'air chaud », (et ce seul libellé est la preuve que le point de vue suivant lequel la conductivité est due à la chaleur est encore prépondérant), une expérience intéressante.

> « Soit *ab* (fig. 4) tendu entre deux fils de cuivre *x* et *y*, un fil fin de platine qui pouvait être porté à l'incandescence par deux éléments Bunsen. Au point *u*, ce fil et avec lui la batterie étaient mis à la terre, à laquelle étaient reliés également une paire de quadrants de l'électromètre. Un deuxième fil fin de platine était en liaison avec la paire de quadrants isolée de l'électromètre et pouvait être approchée à volonté du fil *ab*. Ce fil mobile était placé de telle façon qu'il fût aussi près que possible du point *u*. Par suite s'il y avait une force thermo-

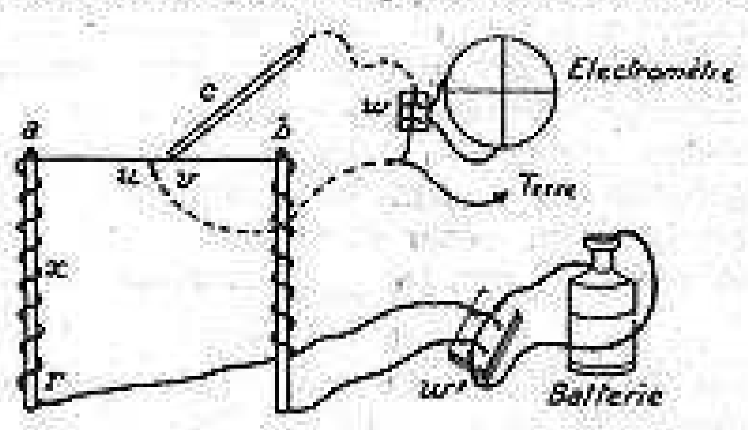


Fig. 4. — (J. Elster et H. Geitel). (*Annalen der Physik und Chemie*, 1882, p. 193, vol. 16, tableau III).

> électrique du fil *ab* elle devait se manifester sur l'électromètre.

> « Il se produisit qu'un fil de platine *c* qui fut approché du fil incandescent se chargea fortement positivement....

> « La force électromotrice se manifeste dépendant en outre de la distance du fil *ab*, de l'état d'incandescence du fil *ab* et de la constitution superficielle du fil *c* ».

11. — En juillet 1883, Fleming [12], en Angleterre, décrit la première de la série d'expériences qui le conduira à la diode détectrice du brevet de 1904. L'auteur, alors conseiller scientifique à la Edison Electric Light Company de Londres, était naturellement occupé à l'étude des lampes à incandescence à filament de charbon.

Le filament était en forme de fer à cheval ; ses extrémités étant recouvertes de cuivre à l'endroit de leur soudure avec la connexion de sortie de la lampe.

L'auteur constate que, si le point de plus grande résistance se trouve en l'un de ces endroits, le cuivre se volatilise et se dépose à l'intérieur du verre.

> « Mais ce qu'il y a de plus curieux est que dans ce cas un examen de l'enveloppe de verre montre qu'il y a une étroite ligne sur laquelle il n'y a pas eu de dépôt de cuivre. En examinant soigneusement la position de la ligne sans dépôt relativement à la position du filament de carbone, on verra qu'elle se trouve dans le plan de la boucle et du côté opposé à l'endroit où s'est produite la rupture du filament. C'est en fait une ombre de la boucle.

> « La conclusion nécessaire est que les molécules de cuivre sont projetées en ligne droite. Sinon il est impossible qu'il y ait cette ligne sans dépôt ».

C'est la première expérience dans laquelle j'ai trouvé l'allusion à une projection de particules par un fil incandescent.

Dans une note de 1885, Fleming [17] parlera d'émission de molécules de carbone par le filament incandescent.

12. — La même année (1883) Elster et Geitel publient un second mémoire « *Sur la production de l'électricité par le contact des gaz et des corps incandescents* » (13). On remarquera par ce seul titre l'évolution de leurs idées depuis le mémoire de l'année précédente.

Les auteurs ont développé leur étude du phénomène ; ils donnent de nouveaux résultats : sur l'influence de l'état d'incandescence ; avec des gaz autres que l'air (anhydride carbonique, gaz d'éclairage, acide chlorhydrique gazeux) ; avec des corps incandescents non métalliques ; sur l'influence de la dimension de l'électrode froide.

Je cite les conclusions :

> « Les particules des gaz expérimentés par nous : air, gaz d'éclairage, gaz carbonique, acide, au contact avec des corps incandescents sont électriquement positives, et de telle sorte que les particules d'électricité sont attachées

également à la particule matérielle, tandis que le corps incandescent est chargé électriquement négativement. La charge du conducteur non incandescent placé dans l'air chaud est d'autant plus grande que l'incandescence du corps qui produit l'électricité est plus élevée et est déterminée par l'état d'incandescence de ce dernier. Elle est indépendante de la nature du gaz chauffé, aussi bien que de la constitution superficielle et de la vitesse de l'électrode frappée par le courant.

. . . .

« La charge de l'électrode placée dans l'air augmente.... quand on agrandit sa surface ».

13. — En 1883-1884, Hittorf publie sa quatrième communication « *Sur la conduction électrique des gaz* » [8]. C'est un long mémoire d'une centaine de pages à la fin duquel il précise le phénomène fondamental déjà observé par Becquerel et qui sera la base des applications de la diode, dans un paragraphe dont le titre suffit à faire apprécier l'importance.

« *Suite des lois maintenant connues des courants gazeux électriques. Si la cathode et son enveloppe sont maintenues à la chaleur du blanc, pendant que l'anode et les autres parties restent froides, un petit nombre d'éléments Bunsen suffisent pour entretenir des courants constants dans les gaz fortement raréfiés* ».

Hittorf utilise en particulier les tubes des fig. 7 et 8. Dans le premier (fig. 7) une spirale de platine est fixée en travers, tandis que, en haut et en bas, deux fils de platine constituent deux autres électrodes. Quant au tube de la fig. 8, il contient deux électrodes constituées l'une par un bâtonnet de carbone (1 mm de diamètre) supporté par deux fils de cuivre *mn*, l'autre par un fil d'aluminium *a* ; le bâtonnet de carbone était chauffé par une batterie Bunsen de 14 éléments ; on obtenait ainsi un chauffage au blanc avec lequel, aussi bien dans le gaz carbonique que dans l'hydrogène, la lumière positive disparaissait complètement.

Voici maintenant la description de l'expérience :

«... nous prenions comme cathode le conducteur le plus réfractaire et le chauffions par un autre (1) courant électrique aussi fort que possible. Les récipients (fig. 12 et 13) sont appropriés pour cela. Si l'on utilise le tube avec la spirale de platine et que nous fassions passer un courant à travers ce dernier, dont on élève peu à peu l'intensité, on voit que la différence de tension des électrodes du courant de gaz ne subit aucune diminution notable tant que le platine n'a pas dépassé de fortes chaleurs du rouge. Avec la coloration jaune de la spirale la différence de tension devient plus petite et diminue ensuite rapidement quand on continue à élever la température.

« Comme, dans ces essais, le platine atteint trop tôt sa température de fusion, j'ai employé comme cathode le bâtonnet de carbone (fig. 13) qui se trouvait constamment dans la partie supérieure du tube de verre tandis que l'anode était en-dessous. Pour rendre le fait bien net, les raréfactions sont faites aussi grandes que

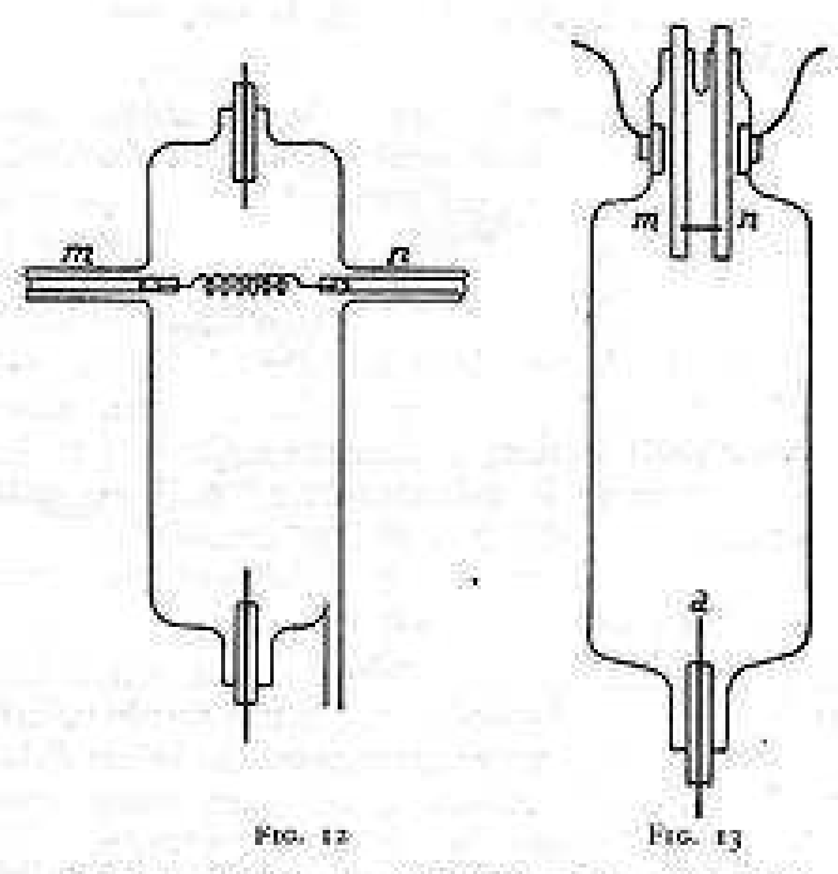


Fig. 12 Fig. 13

(W. Hittorf) (*Annalen der Physik*, vol. 20, 1883, pl. VI).

possible et les traces de gaz que le carbone dégage constamment par élévation de température, sont continuellement aspirées par la pompe. J'ai ainsi réussi quand la distance des électrodes était de 4 cm, à obtenir, même avec dix petits éléments de ma batterie, un courant par lequel le fil d'anode se couvrait d'une lueur bleue. Quand la distance était portée à 8 cm, il fallait 20 éléments.

. . . .

« En insérant un galvanomètre on observe que l'intensité dépend beaucoup de la température de la cathode et augmente très rapidement avec elle.

. . . .

« Si l'on recherche non la décharge lumineuse de l'électricité, mais seulement le passage de celle-ci pour les grandes raréfactions, alors suffisent des forces électromotrices beaucoup plus petites que celles indiquées ci-dessus. Quand la distance de l'électrode dans le tube (fig. 13) était 6 cm, un petit élément, avec des raréfactions aussi grandes que possible et une forte incandescence blanche du carbone, faisait dévier le galvanomètre I, non shunté, de 65 mm.

« On obtient aussi des courants faibles avec de petites forces électromotrices, sans aucune trace de production de lumière pour des pressions plus grandes. Quand le tube (fig. 13), avec la même distance d'électrodes de 6 cm, contient du gaz hydrogène sous la pression de 9 mm, 20 éléments dévient le galvanomètre I,

(1) Autre que celui qui passe entre les deux électrodes du tube.

non shunté, de 15 mm ; quand la pression est abaissée à 4 mm, 10 éléments donnent la déviation de 25 mm ; pour une pression de 2 mm, deux éléments dévient de 20 mm.

« Les intensités de ces faibles courants sans production de lumière sont également dans la plus grande dépendance de la température de la cathode.

« On comprendra que j'ai démontré que ces courants se produisent que si c'est la cathode du tube à gaz qui est portée à cette haute température. Si l'on monte les éléments dans la direction opposée, on n'observe aucune déviation du galvanomètre. Pour bien observer cette différence, j'avais dans le tube de la fig. 13. réduit la distance des électrodes à 4 cm. Alors qu'un petit nombre d'éléments suffisaient à dévier fortement le galvanomètre quand son pôle négatif était relié au charbon incandescent au blanc, 200 éléments le laissaient au repos quand le pôle positif était pris ».

Ainsi, il est établi que, dans le vide, entre une cathode en carbone incandescent et une anode métallique froide, il passe un courant sous une faible différence de potentiel. Aucun courant ne passe avec une différence de potentiel de signe contraire.

Ainsi la diode à cathode de carbone chauffée dans le vide est complètement décrite, et sa propriété fondamentale, qui est de se comporter comme une valve, est parfaitement établie.

Il ne reste plus qu'à rechercher les applications industrielles possibles et à réaliser les perfectionnements technologiques nécessaires pour obtenir la diode de la technique.

Ce sera une œuvre de mise au point, la première application industrielle ne devant apparaître qu'après une vingtaine d'années.

L'exposé qui précède montre d'ailleurs que si l'expérience avait abouti à d'importants résultats, l'interprétation théorique n'avait marqué que peu de progrès. Si le point de vue qui attribuait la conductivité observée à la température élevée du gaz paraissait mis en doute, personne n'avait encore attribué le phénomène à l'émission de particules électrisées par l'électrode incandescente. Il restait encore beaucoup à faire pour aboutir à cette conclusion et déterminer la nature des particules.

14. — A l'époque où HITTORF publiait ces résultats EDISON (1883) ajoutait, à l'intérieur de sa lampe à incandescence à filament de charbon une plaque métallique *d* réunie à l'extérieur à travers l'enveloppe de la lampe. Il constata que, si le filament étant incandescent, la plaque est connectée au pôle + du filament, il passe un courant dans le conducteur de liaison. Il n'y a pas de courant (ou un courant beaucoup moins intense), si la plaque est reliée au pôle —.

EDISON ne publia, sur cette expérience, que les lignes suivantes d'un brevet [14] sans autre avenir, relatif à la régulation des courants d'éclairage.

« J'ai découvert que si une substance conductrice est interposée n'importe où dans le vide dans l'ampoule d'une lampe électrique à incandescence, et si ladite substance conductrice est connectée à l'extérieur de la lampe avec une extrémité, de préférence la positive, du conducteur incandescent, une portion du courant, quand la lampe est en fonctionnement passe à travers le circuit shunt ainsi formé, lequel shunt comprend une partie de l'espace vide dans la lampe. J'ai trouvé ce courant proportionnel au degré d'incandescence ou de la puissance en bougies de la lampe ».

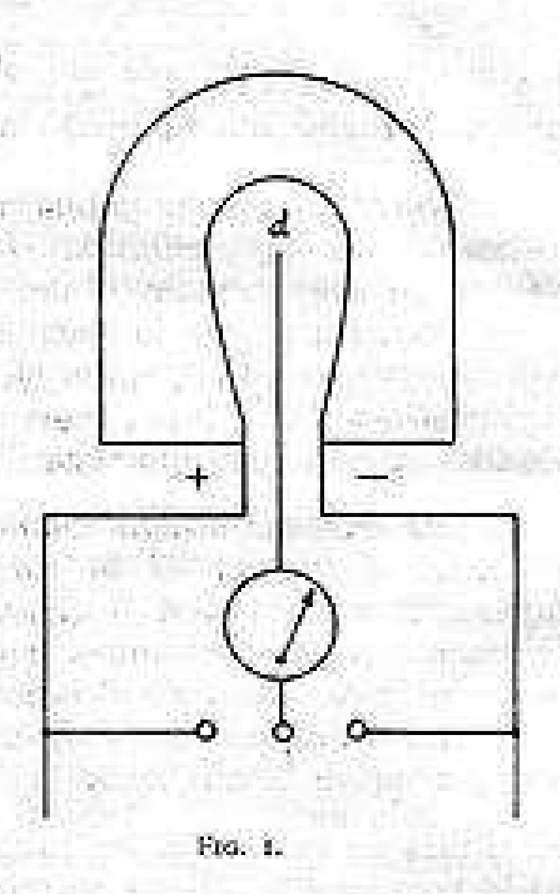


FIG. 1.

Et voici la première revendication :

« 1. La combinaison d'une lampe électrique à incandescence, un circuit comprenant l'espace vide à l'intérieur de l'ampoule de la lampe, et des appareils électriques commandés par le courant passant dans ce circuit, substantiellement comme indiqué dans la description ».

Le dispositif d'EDISON, légèrement postérieur aux travaux de HITTORF, n'est qu'une application particulière du montage plus général expérimenté par celui-ci.

Mais les physiciens anglais, dont les recherches aboutirent à la diode détectrice, semblent avoir ignoré, au moins au début, les travaux de HITTORF. Leur point de départ fut ce qu'ils appelèrent l'effet EDISON et c'est à EDISON qu'est encore souvent attribué le rôle d'initiateur dans l'invention de la diode.

15. — Dans un mémoire publié en 1885, GOLDSTEIN [15] utilise comme électrode chaude le filament de carbone d'une lampe à incandescence.

« ... L'expérience qui conduisit finalement au but reposait sur le chauffage d'une cathode aussi difficilement fusible que possible :

« *Le filament de carbone à incandescence blanche est, placé vis-à-vis d'une autre électrode, une cathode dont la résistance forme une fraction minime de celle se manifestant à la température ordinaire et est assez petite pour, à travers*

un espace aussi bien vidé que possible, décharger non seulement une bobine d'induction, mais même les faibles tensions de faibles batteries galvaniques ».

L'auteur explique qu'il ne put avoir de température suffisante ni avec le platine, dont le point de fusion était trop bas, ni avec le charbon, qui dégageait trop de gaz, jusqu'à l'apparition des lampes à incandescence d'EDISON et SWAN qui

« avec leurs boucles de charbon si résistantes me permirent de reprendre mes essais ».

Et il décrit l'expérience suivante :

« Il me parut intéressant... de déterminer dans quelle mesure le pouvoir d'isolement du vide est diminué par l'incandescence de la cathode, et pour cela quelles tensions suffisaient à produire une décharge à travers un bon vide... Un tube... fut utilisé, dont le filament de charbon était constitué seulement par un simple fer à cheval d'une petite lampe SWAN d'environ 4,5 cm de diamètre. Le filament de charbon *a* constituant une électrode et le bâtonnet d'aluminium ou de platine *b* constituant la seconde électrode furent, après que le tube eût été vidé, reliés aux pôles d'une batterie d'accumulateurs de PLANTÉ à petites plaques, dont on pouvait insérer, par groupes de cinq, jusqu'à 500 éléments.

« Si le filament de charbon restait froid, alors la totalité des 500 éléments ne réussissait pas, comme on devait s'y attendre, à provoquer une décharge à travers le tube très fortement vidé. De même il n'y avait aucune décharge si le filament de charbon était incandescent et était en même temps réuni au pôle positif de la batterie PLANTÉ. Mais la décharge se produisait déjà pour 185 éléments si le filament de charbon était incandescent et servait de cathode ; elle cessait aussitôt si l'incandescence était interrompue... ».

« Chacun des éléments PLANTÉ avait, d'après la détermination du Dr HERTZ, une force électromotrice de 1,8 Daniell quand il était frais ; dans la série d'expériences ci-dessus, les éléments avaient par suite de leur épuisement déjà presque complet, une force électromotrice beaucoup plus petite ».

Le passage d'un courant dans le gaz, dans un seul sens, sous l'action d'une force électromotrice, entre une électrode froide, formant anode, et une électrode chaude suivant la cathode, est nettement confirmé.

16. — En Octobre 1884, W.H. PREECE [16] ingénieur au Post-Office britannique, rencontre EDISON qui lui montre son expérience et lui donne quelques lampes à incandescence dans lesquelles une plaque avait été ajoutée entre les deux jambages du filament en fer à cheval. De retour en Angleterre, il fait une étude expérimentale du phénomène et communique les résultats le 24 mars 1885 à la Royal Society of London.

Il constate, comme l'avait fait EDISON, que le courant est beaucoup plus intense quand la plaque est reliée à l'extrémité + du filament incandescent que quand elle est connectée à l'extrémité —.

L'effet est indépendant du matériau de la plaque (cuivre, fer carbone), et de sa surface.

On l'obtient encore avec la lampe de la figure 3, où la plaque peut être atteinte par des projectiles

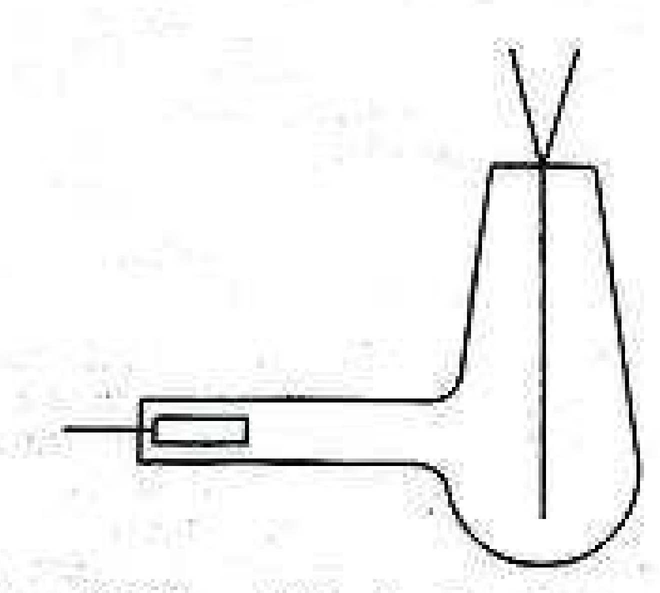


FIG. 3. — (W. H. PREECE) (*Proc. Roy. Soc. of London*, 24 mars 1885, vol. 38, p. 219-230).

arrivant du filament en ligne droite, mais il n'apparaît plus avec celles des figures 4 et 5 où il n'en est plus ainsi.

Et voici la conclusion :

« Il est évident que cet effet EDISON est dû à la formation d'un arc entre le filament de carbone et la plaque métallique fixée dans l'ampoule vide ; que cet arc est dû à la projection de particules de carbone en ligne droite à travers l'espace vide. La projection commencerait au point de moindre résistance. Sa présence est nuisible à la lampe et comme son apparition s'accompagne de l'effet bleu, cette dernière est un avertissement de l'approche du point critique et une indication sûre de ce que la force électromotrice est dangereusement élevée. Il est clair aussi que l'effet EDISON ne se produit que quand nous sommes dans les brisants (among the breakers) et qu'il ne peut être utilisable pour réguler pratiquement les conditions du courant électrique de lumière

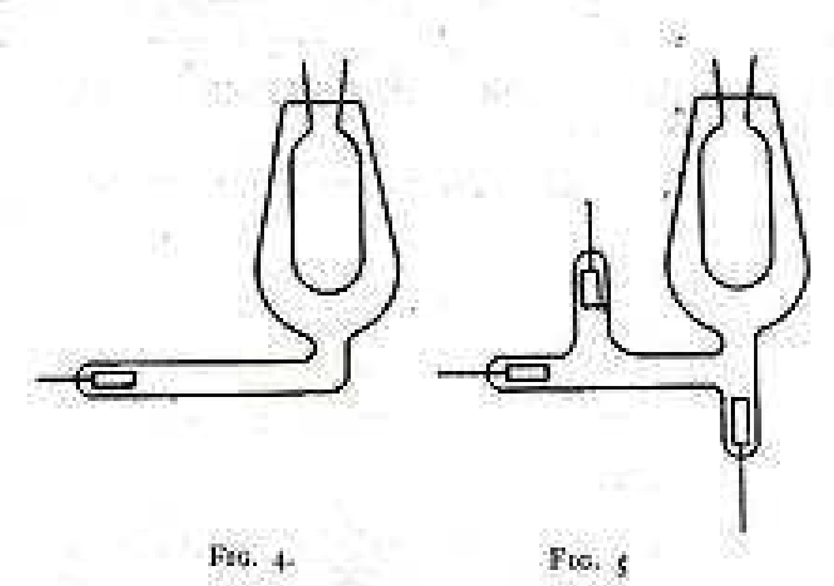


FIG. 4. FIG. 5

(W. H. PREECE) (*Proc. Roy. Soc. of London*, 24 mars 1885, vol. 38, p. 219-230).

comme son ingénieux découvreur l'avait proposé à l'origine ».

Nous sommes loin de l'application pratique du phénomène et de son explication.

17. — En 1887, nouvelle note de Blondlot [18] à l'Académie des Sciences. Reprenant son expérience de 1881 (parag. 9), il confirme d'abord le résultat de Becquerel (voir parag. 6) que c'est à partir de la chaleur du rouge que le courant commence à passer sous l'action d'une force électromotrice entre les deux plaques chauffées placées en regard l'une de l'autre.

Il ajoute, et c'est une précision intéressante, bien que confirmant des faits connus :

> « J'ai recherché ensuite si, en employant des piles de force électromotrice de plus en plus faible, on arriverait à une force électromotrice au-dessous de laquelle le courant ne passerait plus ; j'ai constaté que, une fois la chaleur rouge atteinte, le passage de l'électricité a lieu, même pour une force électromotrice à 1/1000 de volt ; donc, ou bien il n'y a pas de force électromotrice au-dessous de laquelle le courant ne passe pas, ou bien cette force électromotrice est extrêmement petite ».

Et voici pour l'interprétation du phénomène.

> « Quel est le mécanisme de la transmission de l'électricité par l'air chaud ? Je suis porté à penser que ce mécanisme est ce que Faraday a appelé la convection, c'est-à-dire le transport de l'électricité par les particules d'air venant se charger sur chacune des électrodes puis se rendant ensuite sur l'autre en vertu des attractions et des répulsions électriques et s'y déchargeant ».

18. — La même année (1887) Elster et Geitel [19] publient les résultats de la suite de leurs travaux dans un mémoire « Sur l'électrisation des gaz par les corps incandescents ».

Le dispositif expérimental est celui de la fig. 7.

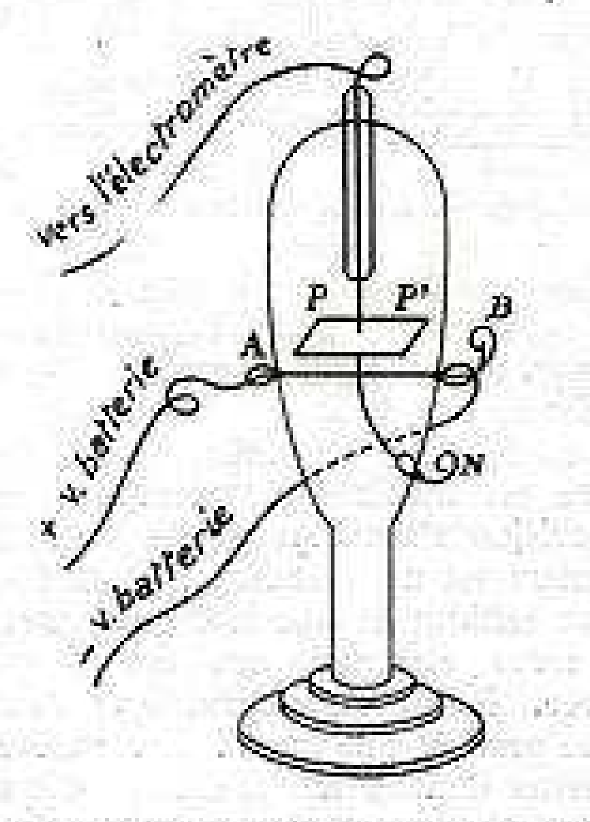


Fig. 7. — (J. Elster et H. Geitel) *Annalen der Physik und Chemie*, 1887, vol. 21, p. 109-126.

Le corps incandescent est un fil de platine. Une plaque *PP'* placée au-dessus, à 1 mm de distance, est reliée à un électromètre à quadrants.

Dans l'air, on constate, comme dans les recherches décrites dans le mémoire de 1883, que le fil de platine étant chauffé au jaune, la plaque se charge positivement. Quand l'incandescence s'accentue, la charge diminue. Pour l'incandescence blanche, elle est la moitié de ce qu'elle était avec l'incandescence rouge.

Avec l'acide carbonique, résultats semblables.

Avec l'hydrogène, la charge de la plaque positive pour une faible incandescence rouge, diminue quand l'incandescence s'avive, puis par belle incandescence jaune, devient négative.

19. — Deux ans après (1889), dans un mémoire relatant de nouvelles expériences, Elster et Geitel [20] complètent ces indications.

Aux très faibles pressions, l'oxygène (à un plus haut degré que les gaz suivants), la vapeur d'eau, les vapeurs de soufre et de phosphore s'électrisent positivement au voisinage d'un fil de platine incandescent avec maximum à la température du jaune. La pression a peu d'influence.

Dans un vide élevé et surtout avec des fils fins à l'incandescence, il se produit graduellement une excitation négative.

L'hydrogène, dans les mêmes conditions s'électrise négativement, la charge croissant avec la température.

Le palladium et le fer se comportent comme le platine.

Au contraire, l'électrode en regard d'un filament en charbon incandescent est toujours négative.

Et les auteurs concluent :

> « Les résultats de la recherche présentée ici ne nous paraissent en aucune façon fortifier l'hypothèse qu'une influence particulièrement déterminante sur la force électromotrice observée puisse être attribuée aux particules solides projetées par le fil incandescent.... ».

La conductivité des gaz près d'une électrode chauffée est attribuée à une dissociation de ceux-ci en ions.

20. — A la même époque, Fleming rentre en scène et, à la fin de 1889, communique à la Royal Society of London [21] un résumé des résultats d'expériences faites au moyen de lampes au carbone spéciales mises à sa disposition par la Edison and Swan United Electric Light Company. Les expériences elles-mêmes furent exposées à la Royal Institution le 14 février 1890 [22].

Fleming rappelle d'abord l'effet Edison et reproduit l'expérience correspondante. Il montre au moyen d'écrans entourant l'un ou l'autre jambage du filament en forme de fer à cheval que c'est le jambage négatif qui constitue la partie active du filament (fig. 6).

Il reproduit les expériences de Preece et les essais des chercheurs précédents avec des électromètres et des condensateurs

Dans l'expérience représentée fig. 12, il montre qu'un courant passe dans le galvanomètre même si la petite lampe *m* est reliée à la terminaison négative de la lampe.

Il décrit fig. 13 une variante des expériences d'Edmond Becquerel (voir parag. 6) et de Blondlot (parag. 9 et 17). Les deux électrodes chauffées sont deux lampes placées dans une même enceinte *V* vide d'air. Il donne les commentaires suivants :

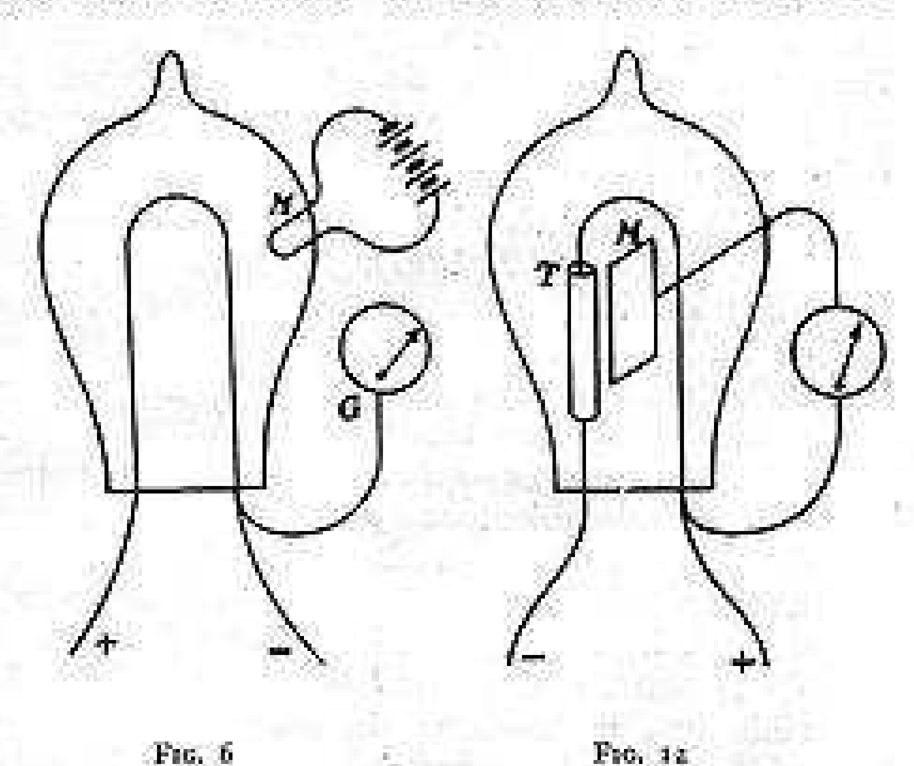


Fig. 6 Fig. 12

Fig. 6. — (J. A. Fleming) (*Proc. Roy. Inst. Great Brit.* février 1891, vol. 13, p. 34-49).

Fig. 12. — (J. A. Fleming) (*Proc. Roy. Inst. Great. Brit.*, février 1891, vol. 13, p. 34-49).

« Un tel tube.... ne laisse pas passer le courant d'une batterie secondaire de quelques éléments si les boucles de carbone sont froides... Mais si, au moyen de batteries secondaires bien isolées nous rendons les deux électrodes de carbone fortement incandescentes, un élément unique d'une batterie est suffisant pour faire passer un courant très considérable à travers l'espace vide pourvu que la résistance du reste du circuit ne soit pas grande. Nous pouvons rendre compte des faits ci-dessus en disant que si

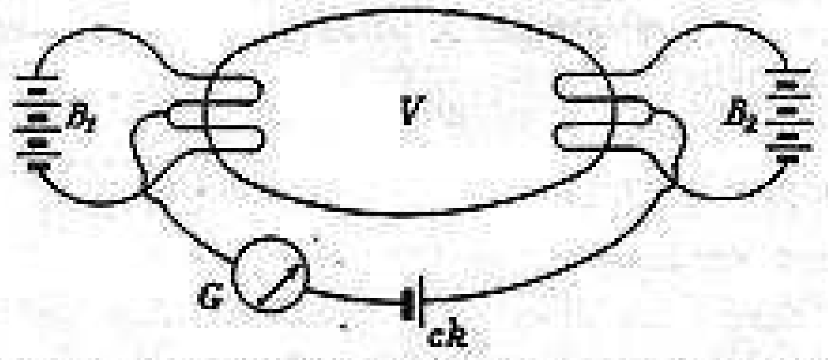


Fig. 13. — (J. A. Fleming) (*Proc. Roy. Inst. Great Brit.*, février 1891 vol. 13, p. 34-49).

les électrodes, mais spécialement l'électrode négative, qui forment le moyen d'entrée et de sortie d'un courant dans un espace vide sont rendues fortement incandescentes, et si à cette haute température on les fait différer de potentiel électrique par l'application d'une très petite force électromotrice, nous pouvons obtenir dans ces circonstances un courant très sensible à travers le gaz raréfié..... ».

Une dernière expérience montre l'existence de l'effet Edison dans l'air à la pression atmosphérique.

Tout ceci, sauf la démonstration du fait que c'est le jambage négatif qui est la partie active du filament, ne représente, en somme, qu'une brillante répétition d'expériences faites auparavant par différents chercheurs.

La communication à la Royal Society donne les conclusions :

a) Dans une lampe d'Edison (avec filament en fer à cheval incandescent et plaque isolée fixée entre les filaments), le potentiel de la plaque est le même que celui de l'entrée négative du fer à cheval.

b) Si le vide est suffisamment bon, un courant passe dans un conducteur de liaison réunissant la plaque à l'entrée positive du filament. Pas de courant si le fil de liaison est connecté à l'entrée négative du filament.

c) « Si la lampe est alimentée en courant alternatif, un courant continu passe dans le fil de liaison entre la plaque et l'une ou l'autre des extrémités du filament... ».

d) L'agent actif est la jambe négative du filament de carbone.

e) La position de la plaque, son aire ont une grande influence sur l'intensité du phénomène.

f) « L'espace vide entre la plaque médiane et la jambe négative chaude du carbone possède... une curieuse conductivité unilatérale. Si un unique élément Clarke est inséré en série avec le galvanomètre... cet élément peut envoyer un courant... quand son pôle négatif est relié à la terminaison négative de la lampe, mais si son pôle positif est en connexion avec la terminaison positive de la lampe aucun courant ne passe ».

Tout ce qui précède était, à peu de chose près, connu avant Fleming. Mais voici l'interprétation des phénomènes :

« Dans le cas de lampes à incandescence, l'hypothèse de la projection de molécules de carbone chargés négativement à partir du conducteur incandescent, à laquelle on peut donner le nom d'*électrovection moléculaire*, suffira à expliquer tous les effets variés différents produits en modifiant la surface, la position et la distance de la plaque métallique sur laquelle ils tombent, et aussi l'effet d'annulation obtenu en séparant par un écran cette plaque de la branche négative du carbone ».

C'est peut-être le point le plus original de la communication. Si elle n'identifie pas correctement les particules émises et, comme l'avait fait Preece, les assimile à des molécules de carbone, elle dit du moins, pour la première fois qu'il s'agit de particules chargés *négativement*.

21. — Le 4 avril 1892, Branly [23] dans une note à l'Académie des Sciences, donne des résultats d'expériences, faites avec un filament incandescent de platine iridié, qui confirment des faits antérieurement connus.

22. — Le 27 juin 1892, dans une nouvelle note, Branly [24] utilise, outre le platine, d'autres corps incandescents :

> « Le sens de la conductibilité (du gaz) varie avec le corps incandescent. Voici quelques exemples :
>
> « Des verres de lampes à gaz, ont été recouverts de métaux porphyrisés ou d'oxydes métalliques. Ces conduits, portés au rouge sombre, ont produit une vive déperdition sur un conducteur froid électrisé distant de quelques centimètres. C'était tantôt une déperdition négative comme avec le platine, tantôt une déperdition positive (aluminium, oxyde de bismuth, de plomb, etc...), tantôt une double déperdition.
>
> « Un conducteur de nickel remplaçant le cuivre d'une lampe à gaz peut décharger rapidement un conducteur positif sans agir sur un conducteur négatif. Dans certains cas avec le même tube, au même degré de rouge, la déperdition négative peut l'emporter..., de même avec le cuivre.... »

Par ces expériences, Branly prélude aux expériences de Wehnelt (1903, parag. 28).

23. — Cependant Fleming [25] avait continué ses recherches et, en 1896, publie un long mémoire dans lequel ses expériences de 1890 sont reprises et assorties de diverses variantes sans qu'un résultat nouveau apparaisse ou qu'un progrès soit fait dans l'interprétation théorique.

24. — Le moment approchait où serait définitivement acquis ce résultat fondamental que toute charge d'électricité négative est une somme de charges élémentaires, toutes de même valeur et portées par des corpuscules de même masse, ou, en d'autres mots, où la notion d'électron s'imposerait.

En 1897, J.J. Thomson [26] étudiant les rayons cathodiques, démontre expérimentalement qu'ils sont constitués de corpuscules pour lesquels le rapport $\frac{e}{m}$ de la charge électrique à la masse est beaucoup plus grand que pour les ions fournis par l'électrolyse des solutions d'acides ou de sels.

En 1898 [27], étudiant les ions produits par l'action des rayons Röntgen sur un gaz, il trouve pour la charge une valeur de 6.10^{-10} unités électrostatiques C.G.S. environ, tandis que le rapport $\frac{e}{m}$ est beaucoup plus petit que pour les corpuscules des tubes cathodiques.

En décembre 1899 [28], dans un mémoire dont la date est une des plus mémorables de l'histoire de la physique, il donne les résultats de la mesure de $\frac{e}{m}$ et de e pour les émissions négatives produites par les corps incandescents ou par les métaux sous l'action de la lumière ultraviolette ; $\frac{e}{m}$ est le même que pour les rayons cathodiques. La charge électrique de toutes ces particules est également la même. L'électron est né.

La lecture du mémoire de J.J. Thomson, de décembre 1899, est d'un intérêt passionnant. On sent, sous la simplicité et la clarté de l'exposé, sourdre l'enthousiasme contenu du créateur devant les perspectives infinies de la voie dans laquelle il engage la marche de la science.

> « Dans un mémoire précédent (Philosophical Magazine, Octobre 1897), j'ai donné une détermination de la valeur du rapport de la masse m de l'ion à sa charge e dans le cas du courant d'électrisation négative qui constitue les rayons cathodiques. Les résultats de cette détermination... montrent que la valeur de ce rapport est considérablement plus faible que celle du rapport correspondant dans les solutions d'acides et de sels et qu'il est indépendant du gaz à travers lequel la décharge passe et de la nature des électrodes.... Il était possible que la petitesse du rapport soit due à ce que e soit plus grand que la valeur de la charge portée par l'ion dans l'électrolyse, plutôt qu'à ce que la masse m soit beaucoup plus petite. Bien qu'il y eût des raisons de penser que e n'était pas très différent de la valeur électrolytique, cependant, comme ces raisons étaient quelque peu indirectes, je désirais si possible obtenir une mesure directe de m ou e aussi bien que de m/e... Le mémoire suivant contient un compte rendu de mesures de m/e et e pour l'électrisation négative déchargée par les rayons ultra-violets, et aussi de m/e pour l'électrisation négative produite par un filament de carbone incandescent dans une atmosphère d'hydrogène »

La méthode, maintenant classique et décrite dans tous les manuels, utilisée pour la mesure de $\frac{e}{m}$ est basée sur le fait que pour une particule électrisée, émise au temps $t = 0$ avec une vitesse nulle, dans un champ électrique X parallèle à Ox et un champ magnétique H croisé avec le premier et parallèle à Oz, la trajectoire est une cycloïde engendrée, dans le plan $x\,o\,y$, par un cercle de diamètre $\frac{2\,X}{H^2}\frac{m}{e}$, roulant sur la ligne $x = 0$.

Supposons alors les particules émises par une cathode plane AB, dans un espace limité par le plan AB et une autre électrode plane CD parallèle à AB. Appliquons un potentiel V entre les deux plaques. Les particules émises en AB atteignent CD si le rayon du cercle générateur est plus grand que la distance d des deux électrodes, c'est-à-dire si

$$d < \frac{2\,X}{H^2}\,\frac{m}{e}$$

Si donc, les plaques étant d'abord très voisines l'une de l'autre, nous augmentons graduellement leur distance, nous observons une valeur critique

$$(1) \qquad d = \frac{2X}{H^2} \frac{m}{e}$$

de cette distance pour laquelle le courant, d'abord à peu près indépendant de la distance, diminue brusquement.

On mesure d, et la formule (1) donne $\frac{e}{m}$, X et H étant supposés connus.

Cette méthode de mesure, appliquée aux ions négatifs émis sous l'influence de la lumière ultraviolette et à ceux émis par un filament de carbone, donna le même résultat. Dans les deux cas, le rapport $\frac{e}{m}$ a une valeur de l'ordre de grandeur de 8.10^6, égal à celui obtenu précédemment pour les ions du tube cathodique, mais beaucoup plus grand que pour les ions de l'électrolyse $\left(\frac{e}{m} = 10^4 \text{ environ}\right)$.

Il restait, pour répondre complètement à la question posée, à mesurer soit m, soit e. C'est e qui fut mesuré, en utilisant la chambre de Wilson, pour les ions négatifs émis sous l'action de la lumière ultraviolette. Les ions à étudier se condensent dans la chambre de Wilson. Leur nombre par centimètre cube est égal à celui des gouttelettes d'eau formées, qu'on obtient en divisant le poids de l'eau recueillie par le volume d'une gouttelette, calculé d'après son diamètre par la formule de Stokes sur la vitesse de chute des gouttelettes sous l'action de la pesanteur. D'autre part on mesure la charge des ions contenus dans 1 cm³ en les faisant tomber sur un plateau connecté à un condensateur de capacité connue et en mesurant la variation du potentiel. Le quotient de cette charge par le nombre d'ions par cm³ donne la charge d'un ion. J.J. Thomson trouva comme valeur moyenne $6,8.10^{-10}$, valeur voisine de celle obtenue précédemment pour les ions émis sous l'action des rayons X, ou pour les ions de l'électrolyse.

Et J.J. Thomson tire cette conclusion :

« Les expériences qui viennent d'être décrites, prises en conjonction avec les précédentes sur la valeur de m/e pour les rayons cathodiques (J.J. Thomson, Philosophical Magasine, octobre 1897), montre que dans les gaz à faible pression l'électrisation négative, bien qu'elle puisse être produite par des moyens très différents, est faite d'éléments ayant chacun une charge d'électricité de grandeur définie ; la grandeur de cette charge négative est environ 6.10^{-10} unités électrostatiques et est égale à la charge positive portée par l'atome d'hydrogène dans l'électrolyse des solutions.

« Dans les gaz aux faibles pressions, ces éléments d'électricité négative sont toujours associés avec des porteurs d'une masse définie. Cette masse est excessivement petite, étant seulement environ $1,4.10^{-3}$ celle de l'ion hydrogène qui est la masse la plus petite jusqu'ici reconnue comme ayant une existence séparée. La production d'électrisation négative implique donc l'éclatement de l'atome puisque d'un groupe d'atomes quelque chose est détaché dont la masse est moindre que celle d'un unique atome ».

. . . .

« D'après ce que nous avons vu, l'ion négatif est une quantité d'importance fondamentale dans toute théorie de l'action électrique ; en effet il ne semble pas improbable qu'il soit la quantité fondamentale en fonction de laquelle tous les processus électriques s'expriment. Car, comme nous l'avons vu, sa charge et sa masse sont invariables indépendantes à la fois des processus par lesquels l'électrisation est produite et des gaz à partir desquels les ions sont mis en liberté ».

C'est, sans que le mot « électron » soit prononcé, une des quelques dates mémorables de l'histoire de l'électricité.

Descendons de ces hauteurs pour suivre notre petite histoire de la diode. La particule négative émise par les corps incandescents est maintenant identifiée. C'est l'électron.

Quant aux ions positifs émis par les corps incandescents, le mémoire de J.J. Thomson ajoute ce qui suit :

« L'émission positive unipolaire d'un fil de platine incandescent dans l'air ou l'oxygène et dans laquelle les corps en mouvement sont électrifiés positivement a été trouvée insensible à l'action d'un champ magnétique de l'ordre de grandeur de celui utilisé dans les expériences sur l'émission négative. Ceci a déjà été observé par Elster et Geitel (Wied. Ann., vol. 38, p. 27).

« Suivant la théorie donnée dans le présent mémoire, l'absence d'effet du champ magnétique sur les porteurs chargés positivement indique $\frac{e}{m}$ est beaucoup plus petit et $\frac{m}{e}$ beaucoup plus grand pour les ions positifs que pour les ions négatifs. Je poursuis des expériences sur l'effet du champ magnétique sur la convection de l'électricité par les ions positifs en utilisant de très forts champs magnétiques produits par un électroaimant puissant.... D'après les résultats que j'ai obtenus il est clair que $\frac{m}{e}$ pour les ions positifs produits par un fil incandescent doit être au moins 1000 fois la valeur obtenue pour les ions négatifs, et ceci est seulement la limite inférieure.

« Les ions positifs et négatifs produits par les solides incandescents montrent la même disproportion de masse que celle qui est mani-

festée par les ions positifs et négatifs dans un tube à vide aux faibles pressions ».

Et maintenant, tout ce qui était fondamental est acquis.

Après ce progrès définitif dans l'interprétation des phénomènes, nous pouvons passer rapidement sur les publications de Mc CLELLAND [29 et 30], (1900 et 1902).

25. — En 1902, nous relevons dans un mémoire de E. BOSE [31] les quelques lignes suivantes :

> « Je crois devoir ne pas laisser non publiées quelques expériences qui concernent les courants dans des gaz entre un corps électrolytique incandescent d'une part et une électrode métallique d'autre part...
>
> « Pour les distances de plus de 10 cm, des courants de 10^{-4} A purent être observés entre le corps incandescent et une autre électrode ».

Le matériau incandescent était le mélange d'oxydes de terres rares du filament de la lampe NERNST. Par cette expérience, BOSE est, après BRANLY [22], un précurseur de WEHNELT [28].

26. — Nous arrivons, en 1903, au célèbre mémoire où RICHARDSON (32) ayant démontré (après J.J. THOMSON) la célèbre formule de l'émission thermionique

$$N = A\ \theta^{\frac{1}{2}}\ e^{-\frac{b}{\theta}}$$

qui donne, pour la saturation, le nombre N d'électrons traversant, pendant une seconde, 1 cm² de la surface d'un corps chauffé, la vérifie pour le platine, le carbone et le sodium.

27. — Nous trouvons ensuite un mémoire de H.A. WILSON [33], (1903).

28. — Pendant ce temps, A. WEHNELT apportait une contribution de première importance en remplaçant les métaux et le charbon utilisés dans les expériences de ses prédécesseurs par des composés métalliques. Ses résultats, d'abord publiés dans deux notes de 1903 [34 et 35], donnèrent naissance à un important brevet allemand N° 157 845 [36] déposé en Allemagne le 15 janvier 1904 (publié le 13 janvier 1905), dans lequel l'application de la diode à cathode chaude et anode froide au redressement des courants alternatifs est indiquée pour la première fois.

Ce brevet tient en une demi-page. Je le reproduis ci-dessous tout entier.

> « Dans un article de l'inventeur sur l'émission d'ions négatifs par des composés métalliques incandescents et les phénomènes connexes (Berichte der physikalisch-medizinischen Societät, Erlangen, m. 150 à 158, 1903) on montre que la chute cathodique à des composés métalliques (oxydes, chlorures, etc...), même jusqu'à de très grandes densités de courants, s'élève à 1 à 2 volts.
>
> « Si, dans un tube à décharge vide de gaz on utilise un composé métallique chauffé comme cathode et une anode froide, consistant en un métal quelconque, le tube, en ce qui concerne la direction du courant, se comporte nettement comme une valve. Le courant, passe dans le tube pour une perte de tension de seulement 20 à 30 volts de l'électrode froide au composé métallique chauffé, tandis que dans le sens opposé des tensions de plusieurs milliers de volts (d'après le degré de vide du tube), seraient nécessaires pour faire passer un courant à travers le tube.
>
> « Ce fonctionnement en valve, combiné à la possibilité de faire passer des courants d'intensités arbitraires à travers lesdits tubes, les rend particulièrement appropriés à la transformation de courants de direction alternative (courants alternatifs mono et polyphasés) en courants de direction unique, suivant des montages bien connus.
>
> « *Revendication.*
>
> « Valve électrique, caractérisée par un tube à décharge avec un composé métallique chaud comme cathode et une anode froide constituée d'un métal arbitraire ».

On notera dans ce texte le passage concernant l'application au redressement des courants alternatifs considéré comme suite nécessaire et connue de l'effet de valve, au sujet duquel une revendication serait sans valeur.

29. — WEHNELT fit ensuite un exposé d'ensemble, en 1904, dans les « *Annalen der Physik* » [37].

Le corps chaud utilisé est un ruban de platine recouvert de l'oxyde métallique à essayer. On constate que, même à une température relativement basse, certains oxydes métalliques émettent des ions négatifs.

Les composés étudiés furent les oxydes de barium BaO et de calcium CaO.

A la pression atmosphérique, alors que le platine émet surtout des ions positifs, même aux températures les plus élevées possibles, le platine recouvert d'oxyde de barium ou d'oxyde de calcium émet surtout des ions négatifs, et en nombre incomparablement plus grand que le platine nu.

A faible pression le platine nu émet surtout des ions négatifs ; avec du platine recouvert d'oxyde de calcium, il n'y a pratiquement pas d'émission d'ions positifs, mais on observe une forte émission d'ions négatifs. Au-dessus d'une pression de 0,1 mm de mercure le courant de saturation diminue quand la pression augmente ; au-dessous, il est à peu près indépendant de la pression.

Avec l'oxyde de calcium CaO, le nombre d'ions émis est environ 1 000 fois plus grand qu'avec le platine nu.

De nombreuses courbes résument les résultats des expériences.

30. — Des résultats semblables furent publiés presque en même temps par G. Owen [38] en Angleterre, sur l'émission de particules chargées par la lampe Nernst (filament composé d'oxydes de terres rares). Les résultats confirment dans l'ensemble ceux qui avaient été trouvés par Wehnelt pour d'autres oxydes.

31. — En 1904, la télégraphie sans fil était née depuis quelques années avec un appareillage technique primitif, notamment du côté de la réception. *Marconi* avait emprunté le cohéreur à Branly ; l'instrument avait été perfectionné ; cependant la difficulté du réglage, l'instabilité, la sensibilité aux parasites l'avaient fait abandonner. Le détecteur magnétique de Marconi avait des avantages, mais était peu sensible. Le détecteur électrolytique avait été proposé, notamment par Ferrié. Le détecteur à cristal qui venait de commencer sa belle carrière avant d'être éliminé provisoirement par le tube électronique, puis de prendre une revanche avec le transistor, était encore peu répandu. Des détecteurs thermiques, des détecteurs électrodynamiques avaient été utilisés ou proposés.

Fleming était depuis 1899 conseil de la Marconi's wireless telegraph company ; il avait été l'un des principaux artisans de la station d'émission de Poldhu d'où étaient partis le 12 décembre 1901, les premiers signaux radioélectriques qui eussent jamais été transmis d'une rive à l'autre de l'Atlantique.

Disons maintenant l'histoire de l'invention de la détection par la diode, d'après un article de W.J. Baker [49]. C'est un jour d'octobre 1904. Obsédé comme tous les radio-électriciens de l'époque par le désir d'un détecteur vraiment pratique, Fleming a l'idée d'essayer de tirer parti de ses recherches sur l'effet Edison. A la hâte, installant un petit émetteur à une extrémité du laboratoire, il reprend une des lampes qui avait servi à ses expériences et la connecte à un récepteur, avec un galvanomètre à miroir. Laissons-le maintenant se raconter lui-même [49] dans une lettre écrite à la Marconi's wireless telegraph company avant le dépôt du brevet anglais 24 850 de 1904, et citée grâce à l'aimable autorisation de cette Compagnie.

> « Il était environ cinq heures de l'après-midi quand l'appareil fut terminé. J'étais, évidemment, très anxieux de l'essayer sans perdre de temps. Nous installâmes les deux circuits à quelque distance l'un de l'autre et je commençai les oscillations dans le circuit primaire.

> « A ma grande joie, je vis que le galvanomètre indiquait qu'un courant continu constant passait et constatai que nous avions dans ce type particulier de lampe électrique une solution au problème du redressement des courants sans fil de haute fréquence. L'outil qui manquait à la sans fil était trouvé et c'était une lampe électrique ».

Et le brevet de la diode détectrice fut déposé en Grande Bretagne le 16 novembre 1904 (Nº 24 850) [39]. Le brevet français correspondant, déposé au nom de la Marconi's wireless telegraph company porte le numéro 355 945 [40]. Le brevet américain [41] nº 803 684, est particulièrement intéressant parce qu'il a été l'objet d'un « disclaimer » en date du 17 novembre 1915, par lequel la Marconi's wireless telegraph company abandonne certaines revendications.

En raison de l'importance de ce brevet, nous citons, d'après la version française, les passages les plus importants.

Voici d'abord le préambule :

> « La présente invention a pour objet un dispositif pour la transformation des courants alternatifs, particulièrement des courants électriques alternatifs à haute fréquence ou oscillations électriques, en courants électriques continus, dans le but de manifester leur présence et de les mesurer au moyen d'appareils ordinaires à courant continu, tels qu'un galvanomètre à miroir du type généralement employé ou par tout ampèremètre à courant continu ».

Et voici la base physique de l'invention :

> « La présente invention est basée sur la découverte suivante, à savoir que l'espace compris entre les deux conducteurs contenus dans une enceinte où le vide a été fait possède lorsqu'un des conducteurs est chauffé à une très haute température, une conductivité électrique unilatérale, l'électricité négative pouvant passer du conducteur chaud au conducteur froid, mais pas en sens inverse ».

L'auteur aborde maintenant l'exposé technique :

> « Comme le conducteur chaud doit être porté à une très haute température, soit près du point de fusion du platine (1 700° C) il est préférable de le constituer en carbone, de préférence en forme de filament tel que ceux employés d'ordinaire dans les lampes électriques à incandescence.... ».

Il décrit, d'après la fig. 1, l'application à la détection des signaux radioélectriques :

. . . .

> « Fig. 1 est une élévation coupe en vraie grandeur d'un appareil construit suivant la présente invention, les connexions électriques étant représentées d'une façon schématique. Cette figure montre l'application de l'invention dans la télégraphie sans fil ».

. . . .

> « A la figure 1, *a* est une ampoule de verre et *b* est un filament de charbon analogue à celui d'une lampe à incandescence..., *C* est un cylindre d'aluminium ouvert par le haut et par le bas et qui entoure le filament sans le toucher...

« Comme il faut produire un vide très élevé et comme une très grande quantité d'air est contenue dans les conducteurs, il faut chauffer ces derniers pendant qu'on fait le vide.

Le filament *b* peut être facilement chauffé dans ce but par le passage d'un courant, tandis que le cylindre *C* peut être chauffé en entourant l'ampoule *a* d'une bobine de résistance traversée par un courant, le tout étant enfermé dans une boîte doublée d'amiante ou de matière analogue...

« Le filament de charbon est porté à une très vive incandescence de la façon habituelle, par un courant électrique continu produit par la batterie *h* dont le pôle négatif est réuni au fil *e* et le positif au fil *f*. Les fils *d* et *e* sont reliés, l'un à l'autre, par un fil *j* qui complète le circuit à travers le secondaire *k* d'une bobine d'induction (telle qu'on en emploie d'habitude dans la télégraphie sans fil) et un galvanomètre *l*. *m* est le primaire de la bobine d'induction dont une extrémité est reliée comme d'habitude à un fil aérien *n* et l'autre à la terre *O* ».

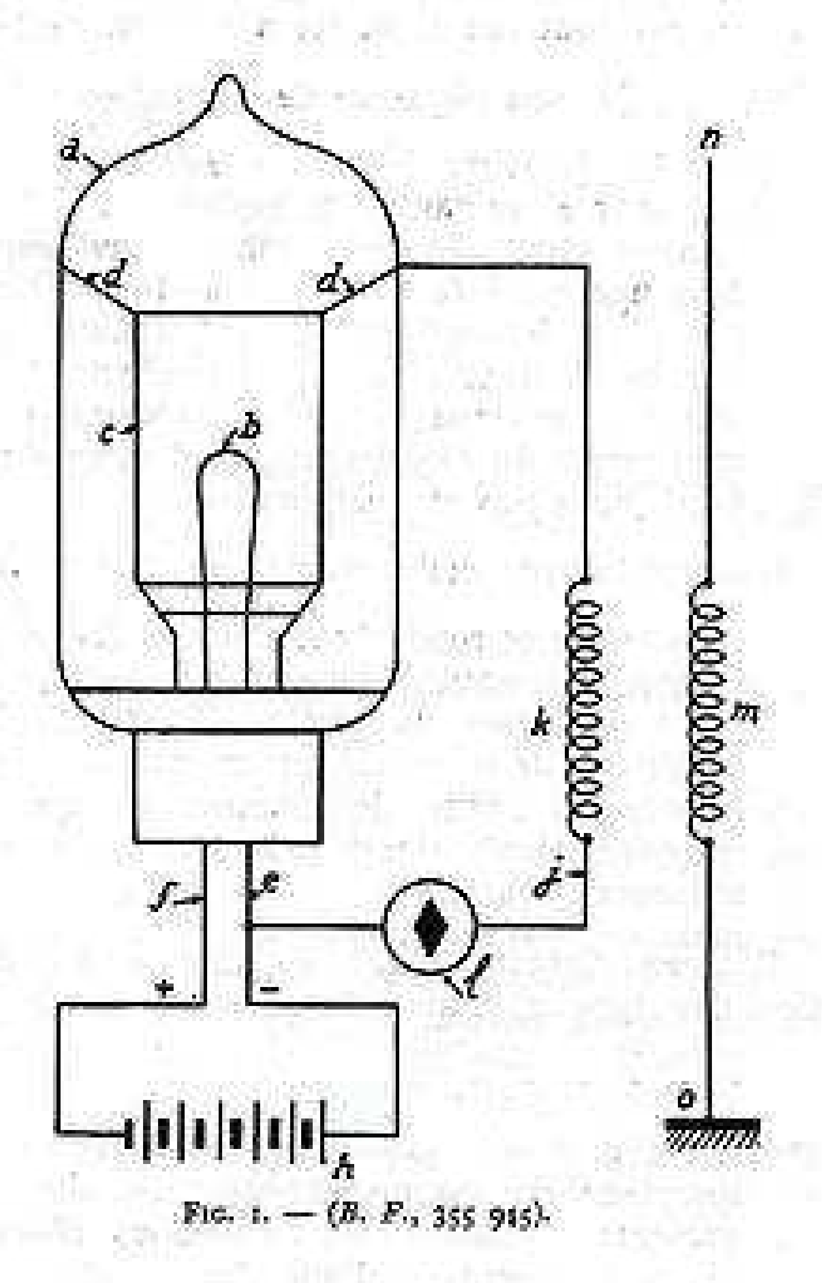


Fig. 1. — (B. F., 355 945).

« Le dispositif décrit ci-dessus fonctionne comme une soupape électrique, et permet à l'électricité négative de passer du charbon chaud à un cylindre de métal *c*, mais pas dans la direction contraire, de façon que les courants élémentaires induits dans la bobine *k* par les ondes hertziennes reçues au moyen du fil aérien *n*, sont redressés et transformés en un courant plus ou moins continu, capable d'actionner le galvanomètre *l* au moyen duquel les signaux peuvent être lus ».

« Quoique la figure 1 montre l'application de l'appareil à la télégraphie sans fil, on comprendra aisément que le fil aérien *n* peut être remplacé par un circuit quelconque, dans lequel il y a une force électromotrice alternative, de basse ou de haute fréquence ».

La figure 2 donne un montage permettant l'utilisation des deux alternances du courant alternatif.

La figure 3 représente un montage à trois valves en parallèle.

Enfin, l'invention reproduit le principe du redressement du courant alternatif de chauffage, déjà indiqué dans la communication du 9 janvier 1890 à la Royal Society of London.

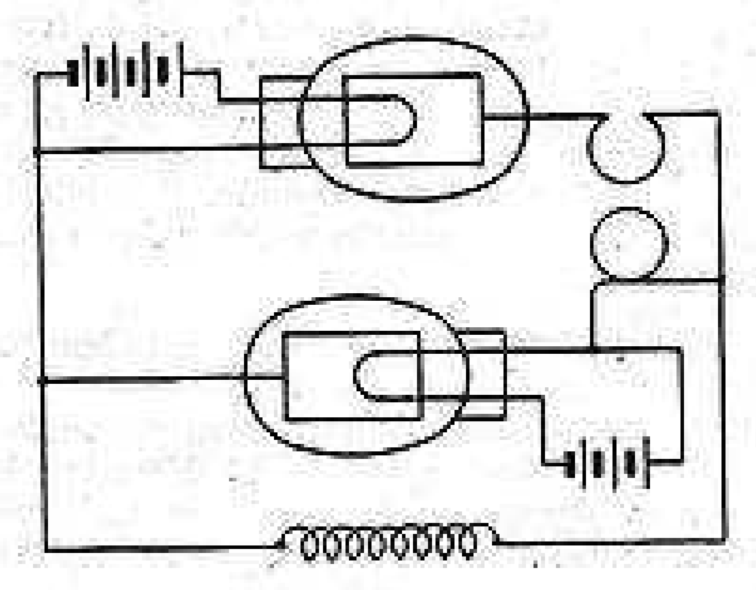


Fig. 2. — (B. F. 355 945).

Je crois intéressant de reproduire aussi les deux revendications du brevet américain 803 684, qui furent opposées dans la suite [48] à la DE FOREST RADIO TELEPHONE AND TELEGRAPH COMPANY et DE FOREST :

« 1. — La combinaison d'une enceinte vide, deux conducteurs adjacents mais ne se touchant pas l'un l'autre, des moyens de chauffer un des conducteurs, et un circuit à l'extérieur de l'enceinte connectant les deux conducteurs ».

. . . .

« 37. — A une tension réceptrice dans un système de télégraphie sans fil utilisant des oscillations électriques de haute fréquence, un détecteur comprenant une enceinte vide, deux conducteurs adjacents mais ne se touchant pas dans l'enceinte, un circuit à l'extérieur de l'enceinte connectant les deux conducteurs, des moyens pour détecter un courant continu dans le circuit, et des moyens pour imprimer sur le circuit les oscillations reçues ».

Tel qu'il vient d'être cité, le brevet décrit le redressement des courants alternatifs, suivant les montages indiqués, aussi bien pour la basse fréquence que pour les fréquences radioélectriques.

Cependant, Wehnelt (voir parag. 28) avait indiqué auparavant les applications à la basse fréquence. Ainsi s'explique-t-on que le brevet Fleming, déposé aux Etats-Unis avec 37 revendications, dont plusieurs ne distinguant pas entre la basse et la haute fréquence, ait été par la suite, l'objet d'un « disclaimer » par lequel la Marconi's wireless telegraph company, propriétaire du brevet, abandonna les combinaisons décrites dans ces dernières revendications.

> « Sauf quand elles sont utilisées en connexion avec des courants de haute fréquence ou oscillations électriques de l'ordre employé dans les transmissions par ondes hertziennes »,

en même temps qu'il supprima dans la description tous les passages visant la basse fréquence.

32. — Les recherches de Fleming furent communiquées à la Royal Society of London le 24 janvier 1905 [43].

Après avoir présenté plusieurs types de diodes (fig. 1), l'auteur indique uniquement l'application de la diode à la détection des ondes radioélectriques, suivant la figure 1 de son brevet de 1904.

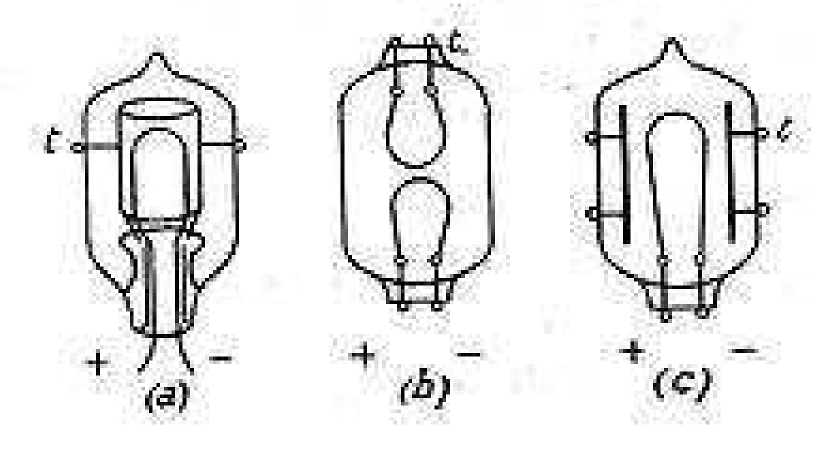


Fig. 1. — (J. A. Fleming) (*Proc. Roy. Soc. of London*, 1905, p. 478).

Il décrit le montage à redressement des deux alternances de la figure 2 du brevet.

Enfin des courbes représentent, pour une diode, à différentes températures du filament, le courant redressé en fonction du potentiel appliqué entre la cathode et l'anode. Ces courbes étant très loin d'être linéaires, l'auteur conclut comme suit :

> « Tandis, par conséquent, que le dispositif est utile comme un moyen simple de détecter les oscillations électriques, il n'a pas cette uniformité de conductivité qui le rendrait utile comme dispositif strictement métrique pour les mesurer. Il peut, cependant, rendre le service utile de nous montrer à quel point un dispositif d'oscillations électriques ou d'ondes électriques produit un train uniforme ou très irrégulier d'oscillations électriques, et quelles modifications conduisent à un perfectionnement ou une réduction du rendement d'un dispositif transmetteur ».

33. — Dans une communication du 26 mars 1906 à la Physical Society [44], Fleming présente d'abord un nouveau modèle de valve (fig. 1).

La seule application visée est encore la détection des oscillations électriques.

En conclusion, il rappelle les expériences de Owen (parag. 30) et Wehnelt (parag. 28 et 29) sur l'émission d'électrons par les oxydes de certains métaux. Il continue cependant à affirmer que la lampe à vide poussé à filament de carbone est préférable à la valve à filament de platine recouvert d'oxyde de calcium ou de barium.

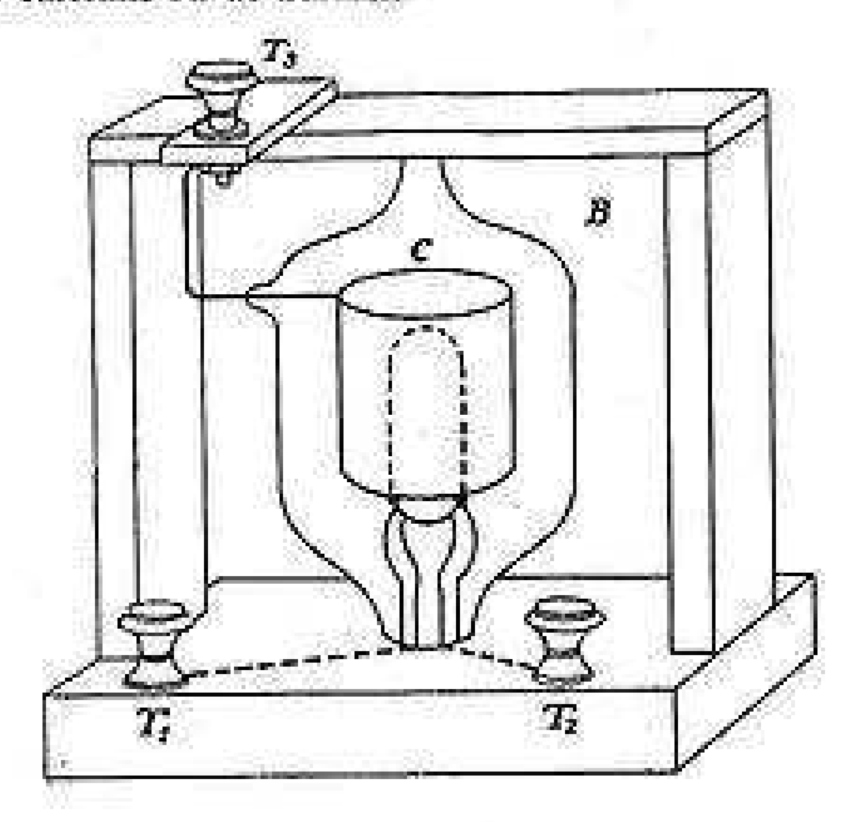


Fig. 1. — (J. A. Fleming) (*Philosophical Magazine*, mai 1906, 6e 6-me série, vol. XI, p. 659-665).

C'est là une opinion que l'avenir ne devait pas ratifier.

34. — Je dois encore signaler, en 1906, la publication de la première édition du grand livre de Fleming [45] « *The principles of electric wave telegraphy* », où les principes et les détails d'une technique alors entièrement nouvelle étaient, pour la première fois, clairement et complètement exposés, et qui est encore le plus imposant monument élevé à la gloire de Marconi.

35. — La valve de Fleming fut pendant quelque temps essayée pour la détection par la Compagnie Marconi. Divers perfectionnements furent apportés, sur lesquels je ne m'étendrai pas, ce modèle de détecteur s'étant révélé sans avenir.

36. — Fleming n'abandonna pas tout de suite son invention.

En 1908 il dépose un brevet [46] en vue de protéger un nouveau montage de détection, basé sur cette remarque que si le voltage constant appliqué entre le filament et la plaque a une valeur telle qu'il corresponde à un point où la pente de la courbe caractéristique varie, alors, si au moyen d'un couplage inductif une force électromotrice oscillante est superposée à ce voltage constant, la valeur moyenne du courant thermionique augmentera tout d'un coup, et un téléphone inséré dans le circuit extérieur au filament et à la plaque donnera un son. La figure ci-dessous donne le montage.

Le même brevet mentionne l'avantage d'utiliser un fil de tungstène comme cathode chaude.

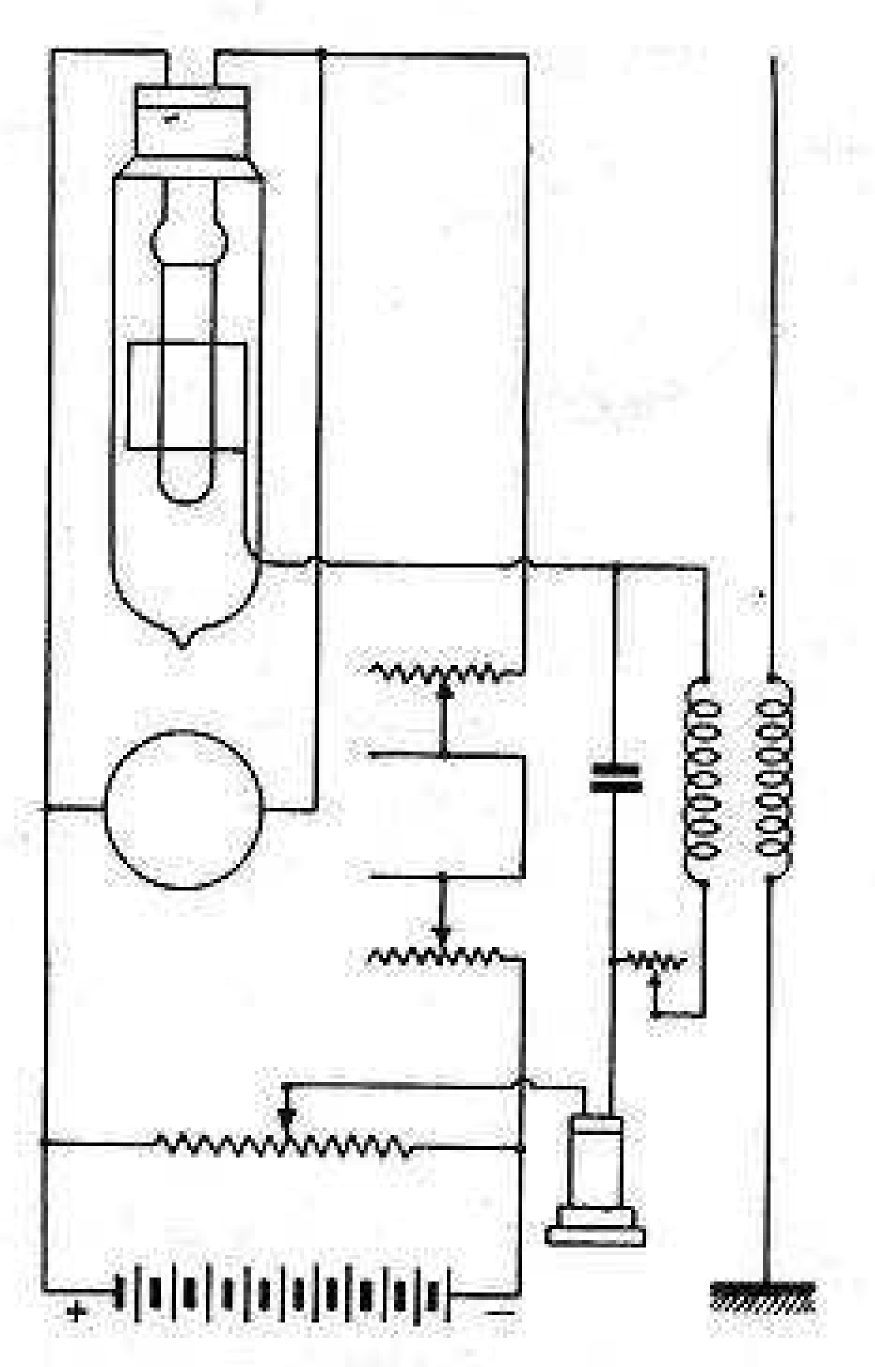


FIGURE du Brevet (*B. P.* 13518/04).

« J'ai découvert que le tungstène sous différentes formes et en particulier dans une forme dans laquelle il est employé comme filament d'une lampe à incandescence est hautement efficace dans ce but puisque la quantité d'électricité négative émise à la température de travail la plus élevée possible peut être de 10 à 20 fois aussi grande que celle émise par le carbone dans un filament de carbone ordinaire ».

C'est une suggestion que la pratique a reconnue valable.

37. — FLEMING cessa en 1908 ses travaux sur la valve à deux électrodes. Est-ce parce que les moyens de recherche lui firent défaut ?

En 1919, il terminera le récit de son œuvre [48] sur une note mélancolique :

« Ce que l'auteur ne put terminer, en 1905 ou 6, des expérimentateurs venus après lui et possédant de meilleurs outils et les ressources du laboratoire de recherches d'une grande société de construction des Etats-Unis ont pu l'accomplir ».

38. — Revenant au 16 novembre 1904, date de dépôt du brevet FLEMING, nous avons trouvé à cette date la diode à filament chauffé dans le vide bien définie dans ses éléments essentiels. Ses propriétés ont été établies expérimentalement, et son principe de fonctionnement a reçu une explication qui paraît définitive.

Sa propriété fondamentale est la conductivité unilatérale de l'espace compris entre les deux électrodes ; elle peut donc être utilisée comme valve de courant et, étant donné la faible masse des particules qui transportent le courant, comme redresseur de courant alternatif, jusqu'à des fréquences supérieures à celles de la technique radioélectrique de l'époque. Cette application au redressement a du reste été décrite par les brevets de WEHNELT et FLEMING.

L'histoire des origines de la valve thermionique est terminée. L'avenir sera l'ère des perfectionnements aussi bien dans la technologie que dans les applications.

39. — La diode à cathode chauffée dans le vide est l'aboutissement d'une longue histoire. Pour apprécier les nombreuses contributions à sa genèse et à ses applications, nous n'avons d'autre moyen, après avoir défini les éléments du dispositif, que de déterminer comment ils se sont successivement introduits puis groupés.

Ce travail est résumé dans le tableau récapitulatif annexé à cette étude.

40. — Examinons donc d'abord la diode en elle-même, et d'abord indépendamment des propriétés physiques et des utilisations.

Dans le brevet FLEMING complété par les présentations à la Royal Society et à la Royal Institution, nous avons dans le vide, ou dans un gaz, deux électrodes, toutes deux chaudes dans une première variante, l'une chaude et l'autre froide dans une autre variante. Si nous considérons ce type le plus général de diode, son inventeur est GROVE (1848) et nous retrouvons le dispositif dans toutes les recherches postérieures (ligne 4 du tableau récapitulatif).

La disposition suivant laquelle les deux électrodes sont incandescentes (ligne 5 du tableau) n'a pas reçu d'application industrielle.

En général une seule des électrodes est incandescente (ligne 6) . Cette disposition se trouve déjà dans les expériences de GUTHRIE (1873) ; c'est celle de la plupart des expériences ; c'est celle qui a reçu la sanction industrielle.

Dans certaines expériences, l'espace compris entre les électrodes est l'air ou un autre gaz à la pression atmosphérique ou à une pression plus faible (ligne 7) C'est une disposition qu'on trouve depuis GROVE (1848) jusqu'à FLEMING (1891). Elle n'a reçu, industriellement, aucune utilisation.

Au contraire le cas où l'espace compris entre les électrodes est vide a une grande importance pour les

applications (ligne 8) ; c'est sous cette forme que sont presque toujours construites les diodes, on la trouvera pour la première fois dans BECQUEREL (1853).

La diode comportant deux électrodes, l'une chaude, l'autre froide, dans le vide (ligne 9) a été utilisée depuis HITTORF (1883) et EDISON (1883) par un grand nombre de chercheurs. Elle a une très grande importance ; c'est la combinaison qui, sous diverses formes, s'est imposée à la pratique.

De nombreux expérimentateurs, en commençant par PRIESTLEY (1766) et GROVE (1848) ont utilisé le platine comme conducteur porté à l'incandescence. C'est le matériau qui a servi le plus souvent, jusqu'au moment où l'on s'aperçut que son point de fusion relativement bas (1 700°) le rendait inutilisable aux températures plus élevées souvent désirables. D'autres ont expérimenté sur le fer : GUTHRIE (1873) ; le palladium (ELSTER et GEITEL, 1889) (voir ligne 12).

Le carbone (voir ligne 10) présente un intérêt historique, du fait que, sous la forme du filament de la lampe EDISON, il constitue l'électrode chaude de la valve de FLEMING. Mais il avait été employé bien auparavant par HITTORF et, l'a été , après, par d'autres chercheurs. Cependant, bien que FLEMING l'ait constamment déclaré préférable à tout autre pour constituer l'électrode incandescente de la diode, il n'a pas reçu la sanction de la pratique industrielle.

Le tungstène, au contraire, a été utilisé comme cathode incandescente, et l'est encore dans certains types de diodes ; il a été proposé par FLEMING en 1908 (ligne 11).

Enfin, il faut faire une place spéciale aux cathodes à oxydes métalliques, et particulièrement aux recherches de WEHNELT (1903-1904) (ligne 13).

41. — Nous en avons terminé avec la diode, produit industriel considéré indépendamment des montages et des applications.

La propriété de la diode, qui, signalée d'abord par E. BECQUEREL (1853) dans les cas où les deux électrodes, chaudes toutes deux, étaient de formes différentes, s'est ensuite confirmée par un grand nombre d'expériences et s'est finalement révélée comme la base de toutes les applications industrielles, est la dissymétrie dans l'action observée sur des appareils ou dans un circuit relié à l'électrode froide. Cette dissymétrie a été signalée sous diverses formes, dans un grand nombre de recherches (ligne 14).

Avec des diodes à une électrode chaude et une électrode froide, ou des dispositifs qui leur sont assimilables, et sans faire pour le moment de distinction entre les formes sous lesquelles cette dissymétrie s'est manifestée, elle a été souvent observée ou utilisée depuis GUTHRIE (1873) (ligne 15).

Si, l'on ne considère que le cas de diodes à une électrode chaude et une électrode froide *dans le vide*, la liste des chercheurs qui ont observé la dissymétrie de l'effet est encore nombreuse, en commençant par HITTORF (1883) (ligne 18).

Deux procédés généraux d'observation ou d'utilisation de la dissymétrie ont été expérimentés ou utilisés. Les premiers sont des procédés électrostatiques, l'instrument d'observation étant un électroscope, un électromètre ou un condensateur. Ils ont eu une grande importance pour l'étude scientifique du phénomène, mais n'ont pas été l'objet d'applications industrielles ; ils ont été employés par les chercheurs indiqués dans la ligne 16, pour le cas de diodes à une électrode chaude et une électrode froide, dans un gaz ou dans le vide (à partir de GUTHRIE, 1873), et dans la ligne 19 pour le cas de diodes à deux électrodes, l'une froide, l'autre chaude, dans le vide (à partir d'ELSTER et GEITEL, 1887).

Les seconds procédés d'observation sont électrocinétiques. La diode est alors une valve de courant ; l'instrument d'observation est le galvanomètre ou un appareil équivalent ; le phénomène observé est le courant, qui peut passer dans un seul sens, celui qui va de l'électrode froide à l'électrode chaude. Ce méthodes ont été utilisées par les chercheurs indiqués dans la ligne 17, pour le cas des diodes à gaz ou à vide, avec une électrode froide et une électrode chaude (à partir de HITTORF, 1883) et dans la ligne 20 pour le cas de diodes *à vide* (également à partir de HITTORF, 1883). Ce mode d'utilisation a une importance considérable ; il est à la base de toutes les applications industrielles de la diode.

42. — Arrivons enfin aux applications.

La première est l'utilisation en tant que valve, pour arrêter ou laisser passer un courant, suivant son sens. Nous avons vu (ligne 20) qu'il y a lieu d'attribuer l'invention à HITTORF (1883).

Un second type d'applications est le redressement des courants alternatifs. Il a été décrit par WEHNELT 1903-1904) (ligne 21).

Un troisième type est la détection des ondes électro-magnétiques, brevetée par FLEMING en 1904 (ligne 22).

43. — Parmi toutes ces contributions aux origines de la diode, quelques noms émergent. Pour les recherches d'ordre scientifique : E. BECQUEREL (1853), GUTHRIE (1873), ELSTER et GEITEL (1882-1889), HITTORF (1883), WEHNELT (1903) ; pour l'interprétation théorique et l'identification progressive des particules émises par l'électrode incandescente : PREECE (1885) qui a proposé l'explication par une émission de particules mais en se trompant sur leur nature (ce ne sont pas les molécules venant de l'électrode), FLEMING (1894) qui indiqua que ces particules étaient négatives mais les considéra comme des ions venant de l'électrode chaude, J.J. THOMSON qui fit le progrès décisif en les identifiant à des électrons ; pour les applications HITTORF qui découvrit le fonctionnement en valve (1883), WEHNELT qui décrivit l'utilisation en redresseur de courant de basse fréquence; FLEMING qui breveta la détection en haute fréquence par diode.

S'il fallait n'inscrire que trois noms sur le fronton d'un monument à la gloire des inventeurs de la diode,

Numéro			1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Date.			2	1848	1853	1873	1881	1882	1883	1869 1884	1883 1884	1885	1885	1887	1887	1889	1890	1891	1891	1894	1896	1899	1900	1901	1902	1903	1901 1904	1903 1904	1903 1904	1904	1904	1905	1906	1908
Auteurs.			3	GROVE	E. BECQUEREL	GUTHRIE	BLONDLOT	ELSTER ET GEITEL	ELSTER ET GEITEL	HITTORF	EDISON	GOLSTEIN	PREECE	BLONDLOT	ELSTER ET GEITEL	ELSTER ET GEITEL	FLEMING	FLEMING	BRANLY	BRANLY	FLEMING	J.-J. THOMSON	Mc CLELLAND	BOSE	Mc CLELLAND	WILSON	RICHARDSON	WEHNELT D.P. 157845	WEHNELT	OWEN	FLEMING	FLEMING	FLEMING	FLEMING
Construction de la diode	Chauffage des électrodes	Deux électrodes, une au moins chaude.	4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		Les deux électrodes sont chaudes.	5	×	×		×							×			×	×			×											×		
		Une électrode chaude, une froide.	6			×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	Espace entre électrodes	Divers gaz, diverses pressions.	7	×	×	×	×	×	×	×				×	×	×		×	×	×	×		×		×	×			×	×				
		Vide.	8		×					×	×	×	×		×	×	×	×			×	×					×	×	×	×	×	×	×	×
	Une électrode froide, une chaude. Vide (combinaison 6 + 8).		9							×	×	×	×		×	×	×	×			×	×					×	×	×	×	×	×	×	×
	Nature de l'électrode chaude	Carbone.	10							×	×	×	×		×	×	×	×			×	×					×				×	×	×	×
		Tungstène.	11																															×
		Autres métaux.	12	×	×	×	×	×	×	×				×	×	×			×	×			×		×	×	×		×					
		Oxydes métalliques.	13																	×				×				×	×	×				
Fonctionnement — Dissymétrie de l'effet	Dissymétrie, toutes diodes		14		×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	Une électrode chaude et une froide. Combinaison 6 + 14	Dissymétrie Combinaison 6 + 14.	15			×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		Dissymétrie électrostatique	16			×	×	×	×						×	×	×	×	×	×	×													
		Conductivité unilatérale. Valve.	17							×	×	×	×	×		×	×	×			×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	Une électrode chaude et une froide dans le Vide. Combinaison 9 + 14	Dissymétrie (9 + 14).	18							×	×	×	×		×	×	×	×			×	×					×	×	×	×	×	×	×	×
		Dissymétrie électromagnétique (9 + 16).	19												×	×	×	×			×													
		Conductivité unilatérale. Valve (9 + 17).	20							×	×	×	×			×	×	×			×	×					×	×	×	×	×	×	×	×
Applications	Redressement des courants de basse fréquence		21																									×			×			
	Direction des ondes électromagnétiques		22																												×	×	×	×

je proposerais pour la recherche expérimentale Elster et Geitel, qui ont démêlé les conditions de production de l'électrisation négative par les corps incandescents ; pour l'interprétation physique J.J. Thomson ; pour les applications Hittorf, qui a décrit le premier le fonctionnement en valve, base de toutes les utilisations. Et ce choix ne m'empêcherait pas d'apprécier à sa juste valeur la contribution apportée à cette grande œuvre par tous les autres noms cités au cours de mon exposé.

Faut-il comme les propriétaires de son brevet l'ont prétendu et parfois fait admettre par les tribunaux, comme le pensent beaucoup de ses compatriotes [49 et 50], comme il en était convaincu lui-même [48], voir en Fleming le génial précurseur de la lampe amplificatrice à trois électrodes, sans qui le fameux brevet américain de Forest 841 347 de 1906, acte de naissance de cette lampe, n'eut pas été déposé ? Faut-il déclarer au contraire son brevet de 1904 sans valeur comme venant après la découverte du fonctionnement en valve par Hittorf, après l'identification des particules émises et la détermination de leurs propriétés par J.J. Thomson, après l'application au redressement des courants alternatifs par Wehnelt ? Fleming ne mérite, je crois, ni cet excès d'honneur ni cette indignité. Il a été l'un des bons artisans dans la suite des travaux et des inventions qui, avec la diode, ont fourni à l'électronique un de ses plus précieux instruments. Et puisque, évidemment, la triode est une combinaison de diodes, il partage avec tous ceux qui l'on précédé la gloire du travail collectif qui a créé les conditions nécessaires et a conduit directement à l'apparition de la lampe à trois électrodes amplificatrice et détectrice.

44. — D'autres titres contribueront à garder son souvenir [50]. Né le 29 novembre 1849, J.A. Fleming acheva le 18 mars 1945, à plus de quatre-ving-quinze ans, une longue vie consacrée à la science et comblée d'honneurs. Cependant, il n'était pas un pur savant, indifférent à tout ce qui n'est pas la recherche désintéressée. Il croyait à la valeur humaine de l'enseignement scientifique, et fut un prestigieux et infatigable conférencier, un professeur de grand talent, préparant avec une égale conscience une causerie à des ouvriers, un exposé bourré d'expériences pour le public de la Royal Institution, un cours pour ses élèves de l'University College, une communication à la Royal Society ou à la Physical Society. Il avait le don de l'exposé scientifique ou technique, l'art de comprendre et, ayant compris, de rendre assimilables et utiles de difficiles théories ; il le fit dans un grand nombre d'ouvrages, dont quelques-uns sont justement célèbres et doivent être cités : *The alternate current transformer*, 2 vol., 1889-1892 ; *Electric lamps and electric lighining*, 1894 ; *A handbook for the electrical laboratory and testing room*, 2 vol., 1901, *The principles of electric wave telegraphy*, 1906 ; *The propagation of electric currents in telegraph and telephone conductors*, 1911. Il fut un expérimentateur : « *banjo de* Fleming », construit en 1880 pour Maxwell, en vue de la comparaison des ohms étalons ; potentiomètres perfectionnés ; effets de résonance en basse fréquence ; liquéfaction des gaz (collaboration avec Dewar) ; photométrie et sources étalons de lumière ; focalisation magnétique dans un tube électronique (1897) ; appareils de télégraphie sans fil, ondemètres, diode détectrice. Il fut un grand ingénieur ; la station de Poldhu, d'où partirent en 1901 les premiers signaux radioélectriques, faits de main d'homme, qui aient traversé l'Atlantique, fut en grande partie son œuvre. Admirable carrière de professeur, de savant, de réalisateur.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Du Fay. — « Second mémoire sur l'électricité » (Histoire de l'Académie. — Mémoires de mathématiques et de physique de l'année 1733, p. 73-84).

[2] W. Watson. — « Experiments and observations tending to illustrate the nature and properties of electricity » (*Philosophical Transactions*, août, septembre, octobre, novembre et décembre 1745, vol. 43, n° 477, p. 481-501).

W. Watson. — « A sequel to the experiments and observations tending to illustrate the nature and properties of electricity » (*Philosophical Transactions*, octobre, novembre, décembre 1747, vol. 44, part. II, n° 484, p. 704-749).

[3] Du Tour. — « Sur la manière dont la flamme agit sur les corps électriques » (Mémoires de mathématiques et de physique présentés à l'Académie Royale des Sciences, 1755, vol. II, p. 246-253).

[4] Joseph Priestley. — « History of Electricity » — 1767.

[5] Joseph Priestley. — « Histoire de l'électricité » (Traduit de l'anglais, chez Herissant & Fils, Paris, 1771).

[6] W. R. Grove. — « On the effect of surrounding media on voltaic ignition » (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 14 décembre 1848, part. 1, 1849, p. 49-59).

[7] Edmond Becquerel. — « Recherches sur la conduction de l'électricité à travers les gaz à des températures élevées » (*Annales de Chimie et de Physique*, 1853, 3e série, t. XXXIX, p. 355-402).

[8] W. Hittorf. — « Über die Electricitätsleitung der Gase » (*Poggendorff's Annalen*, 1869, vol. 136, p. 1-30 et 197-234). (*Poggendorff's Annalen*, 1874, Jubelband, p. 430-445). (*Wiedemann's Annalen*' 1879, vol. 7, p. 553-630). (*Wiedemann's Annalen*, 1883, vol. 20, p. 705-755 ; 1884, vol. 21, p. 90-139).

[9] F. Guthrie. — « On a relation between heat and static electricity » *Philosophical Magazine*, octobre 1873, vol. XXXI, p. 257-264).

[10] R. Blondlot. — « Sur la conductibilité voltaïque des gaz chauffés » (*Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, 4 avril 1881, vol. 92, p. 870-872).

[11] J. Elster & H. Geitel. — « Über die Electricität der Flamme » (*Wiedmann's Annalen*, 1882, vol. XVI, p. 193-222).

[12] J. A. Fleming. — « On a phenomena of molecular radiation in incandescence lamps » (*Philosophical Magazine*, juillet 1883, vol. 16, p. 48-49).

[13] J. Elster & H. Geitel. — « Über Electricitätserregung beim contact von Gasen und glühenden Körpern » (*Wiedmann's Annalen*, 1883, vol. XIX, p. 588-624).

[14] Brevet des Etats-Unis U.S.P. 307 031, déposé le 15 novembre 1883, accordé le 24 octobre 1884 (Thomas A. Edison).

[15] E. Goldstein. — « Über elektrische Leitung im Vacuum » (*Wiedemann's Annalen*, 1885, vol. 24, p. 79-92).

[16] W. H. Preece. — On a peculiar behaviour of glow lamps when raised to high incandescence » (*Proceedings of the Royal Society of London*, 24 mars 1885, vol. XXXVIII, p. 219-230).

[17] J. A. Fleming. — « On molecular shadows in incandescent lamps » (*Philosophical Magazine*, août 1885, vol. 20, 5e série, p. 141-144).

[18] R. Blondlot. — « Recherches sur la transmission de l'électricité à faible tension par l'intermédiaire de l'air chaud » (*Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, 31 janvier 1887, vol. 104, p. 283-286).

[19] J. Elster & H. Geitel. — « Über die Electrisirung der Gase durch glühende Körper » (*Wiedemann's Annalen*, 1887, vol. 31, p. 109-124).

[20] J. Elster & H. Geitel. — « Über die Electricitäts Erregung beim Contact verdünnter Gase mit galvanisch glühenden Drahten » (*Wiedmann's Annalen*, 10 mai 1889, vol. 37, p. 315-319).

[21] J. A. Fleming. — « On electric discharge between electrodes at different temperatures in air and in high vacua » (*Proceedings of the Royal Society of London*, 9 janvier 1890, vol. 47, p. 118-126).

[22] J. A. Fleming. — « Problems in the physics of an electric lamp » (*Proceedings of the Royal Institution of Great Britain*, février 1891, vol. 13, p. 34-49).

[23] E. Branly. — « Nouvelle conductibilité unipolaire des gaz » (*Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, 4 avril 1892, vol. 114, p. 831-834).

[24] E. Branly. — « Sur la conductibilité d'un gaz compris entre un métal froid et un corps incandescent » (*Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, 27 juin 1892, vol. 114, p. 1531-1534).

[25] J. A. Fleming. — « A further examination of the Edison effect in glow lamps » (*Philosophical Magazine*, juillet 1896, 5e série, vol. 42, p. 52 à 102).

[26] J. J. Thomson. — « Cathode rays » (*Philosophical Magazine*, octobre 1897, 5e série, vol. 44, p. 293-314).

[27] J. J. Thomson. — « On the charge of electricity carried by the ions produced by Röntgen rays » (*Philosophical Magazine*, décembre 1898, 5e série, vol. 46, p. 528-545).

[28] J. J. Thomson. — « On the masses of the ions at low pressures » (*Philosophical Magazine*, décembre 1899, 5e série, vol. 48, p. 547-567).

[29] Mc Clelland. — « On the conductivity of gases from an arc and from incandescent metals » (*Proc. Camb. Phil. Soc.*, 1900, vol. 10, p. 241-257).

[30] McClelland. — « On the action of incandescent metals in producing electric conductivity in gases » (*Proc. Camb. Phil. Soc.*, 1902, vol. 11, p. 296-305).

[31] E. Bose. — « Über die Natur der Electricitätsleitung in electrolytischen Glühkörpern » (*Annalen der Physik*, 1902, vol. 9, p. 164-184).

[32] O. W. Richardson. — « The electrical conductivity imparted to a vacuum by hot conductors » (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A. 26 mars 1903, vol. 201, p. 497-549).

[33] H. A. Wilson. — « On the discharge of electricity from hot platinium » (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A. 18 juin 1903, vol. 202, p. 242-275).

[34] A. Wehnelt. — « Austritt negativer Ionen aus glühenden Kathoden » (*Sitzungsberichte der Physik Med. Sz. Erlangen*, 1903, p. 150-158).

[35] A. Wehnelt. — « Kathodenstrahlen an glühenden Kathoden » (*Verhandl. d. Deutsch. Physik. Gesellschaft*, 1903, p. 255-258 et 423-426).

[36] Brevet allemand 157 845, demandé le 15 janvier 1904, accordé le 13 janvier 1905 (A. Wehnelt).

[37] A. Wehnelt. — « Über die Austritt negativen Ionen aus glühenden Metallverbindungen Erscheinungen » (*Annalen der Physik*, 12 juillet 1904, vol. 14, p. 425-468).

[38] G. Owen. — « On the discharge of electricity from a Nernst filament » (*Philosophical Magazine*, août 1904, vol. VIII, 6e série, p. 230-258).

[39] Brevet anglais 24 850/04, déposé le 16 novembre 1904, accordé le 21 septembre 1905 (J. A. Fleming).

[40] Brevet français 355 945, demandé le 6 juillet 1905, (*Marconi's Wireless Telegraph Company*).

[41] Brevet américain 803 684, accordé le 7 novembre 1905 (J. A. Fleming).

[42] Lettre de J. A. Fleming, antérieure au dépôt du brevet anglais 24 850/04 (*Marconi's Wireless Telegraph Co*).

[43] J. A. Fleming. — « On the conversion of electric oscillations into continuous currents by means of a vacuum tube » (*Proceedings of the Royal Society of London*, 16 mars 1905, vol. 74, p. 476-488).

[44] J. A. Fleming. — « The construction and use of oscillating valves for rectifying high frequency electric currents » (*Philosophical Magazine*, mai 1906, 6e série, vol. XI, p. 659-665).

[45] J. A. Fleming. — « The principles of electric wave telegraphy (1 vol. Longmans, Green & Co., London, 1906).

[46] Brevet anglais 13 518/08, demandé le 25 juin 1908, accordé le 10 décembre 1908 (J. A. Fleming).

[47] J. J. Thomson. — « Passage de l'électricité à travers les gaz » (chap. VIII). (Gauthier-Villars, Paris, 1912).

[48] J. A. Fleming. — « The thermionic valve and its developments in radiotelegraphy and telephony » (1 vol. *Wireless Press Ltd*, London, 1919).

[49] W. J. Baker. — « Fiftieth anniversary of the valve » (*Electronic Engineering*, novembre 1954, vol. 26, p. 466-469).

[50] J. T. McGregor Morris. — « The inventor of the valve » (1 vol. *The Television Society*, London, 1954).